La danza de los Maestros de Wu Li

La Nueva Física, sin matemáticas ni tecnicismos, para los amantes de la Filosofía y de la Sabiduría Oriental

GARY ZUKAV

3.ª edición

Cuando Gary Zukav asistió por primera vez a una convención sobre física cuántica, descubrió tres cosas: 1) que entendía todo lo que decían los físicos; 2) que sus debates se parecían mucho a una reflexión sobre teología, y 3) que la física es una aventura extraordinariamente estimulante que es **inseparable de la filosofía.**

Y es que, en esencia, la física es simple: es la pregunta, asombrada, de cómo son las cosas y el *divino* interés en saber cómo son. La física, desnuda de su complejo lenguaje matemático, se convierte en un puro arte de encantamiento.

Este libro es una *traducción* amena y accesible para que personas sin preparación científica entiendan el extraordinario proceso que está teniendo lugar en la física teórica, así como la cada vez mayor proximidad entre la visión científica y la filosofía oriental. Sin embargo, y a pesar de su sencillez, su contenido es totalmente riguroso gracias a la colaboración de un notable grupo de físicos que aparecen relacionados en la nota de agradecimientos.

«La mayor parte de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos.»

Albert Einstein

La danza de los maestros de Wu Li

La nueva física sin matemáticas ni tecnicismos, para amantes de la filosofía y la sabiduría oriental

GARY ZUKAV

COLECCIÓN

CONCIENCIA GLOBAL

La danza de los maestros de Wu Li

La nueva física,
sin matemáticas ni tecnicismos,
para amantes de la filosofía
y la sabiduría oriental

GARY ZUKAV

Gaia Ediciones

Primera edición: marzo de 1999
Tercera edición: septiembre de 2006

Título original: *The Dancing Wu Li Masters*

Traducción cedida por Plaza & Janés

© 1979 by Gary Zukav

De la presente edición española:
© Gaia Ediciones, 1999
Alquimia, 6
28933 Móstoles (Madrid) - España
Tels.: 91 614 53 46 / 58 49
Fax: 91 618 40 12
e-mail: contactos@alfaomega.es
www.alfaomega.es

Depósito Legal: M. 36.661-2006
ISBN: 84-88242-87-5

Impreso en España por: Artes Gráficas COFÁS, S.A. - Móstoles (Madrid)

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados pueden ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (artículos 270 y siguientes del Código Penal). El **Centro Español de Derechos Reprográficos** (www.cedro.org) vela por el respeto de los citados derechos.

TABLA DE MATERIAS

Lista de personajes 11
Prólogo, por David Finkelstein 15
Introducción 19

¿WU LI? 25
Una gran semana en Gran Sur 25
A Einstein no le gusta 39

MODELOS DE ENERGÍA ORGÁNICA 61
¿Entes vivos? 61
Lo que pasa 83

MI SENDA 103
El papel del «Yo» 103

INSENSATEZ 127
Mente de principiante 127
Insensatez especial 143
Insensatez general 167

ME AFERRO A MIS IDEAS 193
El zoo de las partículas 193
La danza 213

ILUMINACIÓN 251
Más que ambos 251
El fin de la Ciencia 277

Notas 311
Bibliografía 317
Índice 321
Índice alfabético 325
Índice de materias 341

Este libro está dedicado a ti, que sientes el deseo de leerlo.

AGRADECIMIENTO

No puedo expresar lo suficientemente mi gratitud hacia las siguientes personas. Mientras estaba escribiendo este libro, descubrí que los físicos, desde los estudiantes recién graduados a los laureados con el Premio Nobel, componen un grupo de gente simpática, accesible, dispuesta a ayudar y capaces de interesarse por la obra ajena. Este descubrimiento conmovió mis ideas, sustentadas durante mucho tiempo, estereotipadas, sobre la personalidad científica fría y «objetiva». Ésta es la razón principal por la que estoy agradecido a las personas que a continuación se citan:

Jack Sarfatti, Doctor en Física, Director del «Physics/Consciousness Research Group», es el catalizador sin el cual las siguientes personas y yo no nos hubiéramos encontrado. Al Chung-lian Huang, el Maestro de T'ai Chi, me ofreció la perfecta metáfora de «Wu Li», inspiración y una bella caligrafía. David Finkelstein, Doctor en Física, Director de la Escuela Superior de Física del Instituto Tecnológico de Georgia, fue mi primer profesor-tutor. Estos hombres son los padrinos de este libro.

Aparte de Sarfatti y Finkelstein, los físicos siguientes leyeron y comentaron el manuscrito completo, capítulo tras capítulo: Henry Stapp, Doctor en Física, del Lawrence Berkeley Laboratory, que repetidas veces se tomó la molestia y el tiempo necesario para contestar a mis numerosas preguntas; Brian Josephson, Catedrático de Física en la Universidad de Cambridge, y Max Jammer, Catedrático de Física en la Universidad de Bar-Ilan, Ramat-Gan, Israel.

Estoy también en deuda con Elizabeth Rauscher, Doctora en Física, fundadora y patrocinadora del «Fundamental Physics Group» en el «Lawrence Berkeley Laboratory», que permitió a gentes que no eran físicos que tomaran parte en las conferencias semanales que, normalmente, sólo hubieran atraído a físicos. Además de Stapp y Sarfatti este grupo incluye al Doctor en Física John Clauser; a Philippe Eberhard; George Weissman; Fred Wolf y Fritjof Catra (todos ellos doctores en Física) entre otros.

Le estoy agradecido a Carson Jefferies, Catedrático de Física de la Universidad de California, en Berkeley, por su apoyo y sus comentarios sobre algunas partes del manuscrito; a David Bohm, Catedrático de Física en el Birkbeck College de la Universidad de Londres, por haber leído parte del

manuscrito; a Saul-Paul Sirag, por su frecuente ayuda; a los físicos del «Particle Data Group», Lawrence Berkeley Laboratory, por su asistencia y colaboración en la elaboración de la Tabla de Partículas que se incluye al final del libro; a Eleanor Criswell, Catedrático de Psicología, Universidad Estatal de Sonoma (California), por su valioso apoyo; a Gin McCollum, Catedrático de Matemáticas en la Universidad Estatal de Kansas por su comprensivo y paciente tutelaje; y a Nick Herbert, Director del «C-Life Institut», que me facilitó excelentes publicaciones sobre el Teorema de Bell y por autorizarme a usar su título *More than both* (Más que ambos), para titular uno de mis capítulos.

Todas las ilustraciones de este libro han sido realizadas por Thomas Linden Robinson.

Harvey White, Catedrático «Emeritus», del Departamento de Física de la Universidad de California, en Berkeley, y ex director del Lawrence Hall de ciencia, que personalmente me facilitó fotografías de su famosa simulación de la posibilidad de distribución de formas. La fotografía de la difracción del electrón me fue facilitada por Ronald Gronsky, Doctor en Física, del Lawrence Berkeley Laboratory. Aprendí muchas cosas sobre espectroscopia de Summer Davis, Catedrático de Física en la Universidad de California en Berkeley.

Repito: les estoy profundamente agradecido a esos hombres que, al igual que todos los demás físicos con los que estuve en contacto mientras escribía este libro, ofrecieron graciosamente su tiempo y sus conocimientos a un desconocido que necesitaba ayuda.

También estoy en deuda con Maria Guarnaschelli, mi editora, por su sensibilidad y erudición.

Sin la generosidad de Michael Murphy y el cuadro de directores del Instituto Esalen, que patrocinaron en 1976 la Conferencia sobre Física y Consciencia, posiblemente nada de esto hubiera sido posible.

LISTA DE PERSONAJES

THOMAS YOUNG
1803 (experimento de la doble rendija)
ALBERT MICHELSON, EDWARD MORLEY
1887 (el experimento de Michelson Morley)
GEORGE FRANCIS FITZGERALD
1892 (contracciones de Fitzgerald)
HENDRIK ANTOON LORENTZ
1893 (las transformaciones de Lorentz)
ELECTRÓN
1897 (descubierto)
MAX PLANCK
1900 (la hipótesis del quántum)
ALBERT EINSTEIN
1905 (teoría de los fotones)
1905 (teoría especial de la relatividad)
HERMANN MINKOWSKI
1908 (espacio-tiempo)
NÚCLEO
1911 (descubierto)
NIELS BOHR
1913 (modelo del átomo de órbitas específicas)
ALBERT EINSTEIN
1915 (teoría general de la relatividad)
LOUIS DE BROGLIE
1924 (ondas de la materia)
NIELS BOHR, H. A. KRAMERS, JOHN SLATER
1924 (primer concepto de las ondas de probabilidad)
WOLFGANG PAULI
1925 (el principio de exclusión)
WERNER HEISENBERG
1925 (mecánica matriz)
ERWIN SCHRÖDINGER
1926 (la ecuación de onda de Schrödinger)

1926 (equipara la mecánica matriz con la mecánica de las ondas)
1926 (visita a Bohr en Copenhague para combatir la idea de los saltos del quántum... y enferma de gripe)

Max Born
1926 (interpretación de la probabilidad en la función de onda)

Niels Bohr
1927 (complementariedad)

Clinton Davisson, Lester Germer
1927 (el experimento Davisson-Germer)

Werner Heisenberg
1927 (principio de incertidumbre)

La interpretación de la mecánica cuántica de Copenhague
1927

Paul Dirac
1928 (antimateria)

Neutrón
1932 (descubierto)

Positrón
1932 (descubierto)

John von Neuman
1932 (la lógica del quántum)

Albert Einstein, Boris Podolsky, Matahn Rosen
1935 (publicación del EPR)

Hideki Yukawa
1935 (predice el mesón)

Mesón
1947 (descubierto)

Richard Feynman
1949 (diagramas de Feyman)

Dieciséis partículas nuevas
1947-1954 (descubiertas)

Los mundos múltiples, interpretación de la mecánica cuántica
1957

David Finkelstein
1958 (hipótesis de la membrana de dirección única)

James Terrell
1959 (explicación de la rotación)

Quásares
1962 (descubiertos)

Quarks
1964 (hipótesis de su existencia).

David Bohm
1970 (orden implicado)

Stuart Freedman, John Clauser
1972 (experimento Freedman-Clauser)

DOCE PARTÍCULAS NUEVAS
1974-1979 (descubiertas)
JACK SARFATTI
1975 (teoría de la transferencia de información superlumínica)
ALAIN ASPECT
1978 (el experimento de Aspect, en realización progresiva)

PRÓLOGO

En 1976, cuando Gary Zukav anunció su proyecto de escribir este libro y esbozó su esquema con Al Huang y conmigo, sendados en torno a una mesa del comedor de Esalen, no me di cuenta exacta de la magnitud del trabajo que con tanta alegría cargaba sobre sus espaldas. Fue muy provechoso para mí observar el desarrollo del libro, porque Zukav había insistido en recopilar a fondo la total evolución de la actual física relativista del quántum, tratrando su temática como si estuviera desarrollando un relato literario. Como consecuencia de ello, este libro no sólo resulta de amena lectura, sino que pone en contacto al lector con los diversos caminos seguidos por los físicos para poder explicar algo que resulta muy difícil de explicar. En resumen: Gary Zukav ha escrito un libro buenísimo para los legos en esta materia.

La actitud de Zukav con respecto a la física es muy parecida a la mía —así que yo también debo ser un lego— y resulta más estimulante hablar con él de física que con la mayor parte de los profesionales. Sabe que la física es —entre otras muchas cosas— un intento de establecer una relación de armonía con una entidad muy superior a nosotros mismos, lo que exige de nosotros primero buscar, formular y, después, desarraigar, unos tras otros, nuestros más queridos prejuicios y viejos hábitos mentales en una búsqueda infinita de lo inalcanzable.

Zukav ha tenido la amabilidad de ofrecerme estas páginas para que añada mi propio entusiasmo al mucho que él, personalmente, ha puesto en su relato. Puesto que hace tres años que nos conocimos, tengo que procurar activar mis recuerdos.

Lo primero que viene a mi memoria es un grupo de ballenas migratorias. Recuerdo que nos hallábamos de pie, en los arrecifes de Esalen, observando cómo saltaban alegremente mientras nadaban rumbo al sur. Después acude a mi mente el recuerdo de unas preciosas mariposas *Monarch,* que en ese primer día moteaban los campos con sus colores y cubrían un árbol mágico como si fueran tupidas hojas, como para una gran fiesta. Entre esas dos visiones de ballenas y mariposas nos resultaba muy difícil sentirnos importantes y mucho más sencillo ponernos a divagar.

La ardua dificultad para comunicarse con los físicos de Esalen me ayudó a darme cuenta de qué manera tan diferente a la mía pensaban la mayor parte de los físicos sobre la mecánica cuántica. No porque mi punto de vista fuese nuevo. Era uno de los dos señalados por John von Neumann, en 1934, en su libro *The Mathematical Foundation of Quantum Mechanic:*

1) La mecánica cuántica se ocupa de las proposiciones definidas por los procesos de preparación y observación que involucran al sujeto y al objeto, y obedece a una nueva lógica. No se ocupa de las propiedades objetivas del objeto por sí solo.
2) La mecánica cuántica se ocupa de las propiedades objetivas del objeto en sí, obedeciendo a la antigua lógica, pero observa que esas propiedades pasan a actuar de manera ilógica cuando son sometidas a observación.

La mayor parte de los físicos en activo sólo parecen discurrir por uno de esos caminos (el segundo) y no toman en consideración el otro. Y tal vez la personalidad puede determinar la dirección de la ciencia. Pienso que hay mentes-«cosa» y mentes-«gente». Los buenos padres, los sicólogos y los escritores deben ser «gente», mientras que los macánicos, los ingenieros y los físicos tienden a ser mentes-«cosa». La física se ha vuelto demasiado aterradora para estos físicos porque, en realidad, está demasiado desmaterializada para ellos. Nuevos cambios evolutivos tan profundos como los de Einstein y Heisenberg están esperando a que llegue una generación de pensadores más atrevidos e integrados.

Mientras que la mayor parte de los físicos aceptan como algo corriente el instrumental práctico que la mecánica cuántica pone en sus manos para que lo utilicen en su trabajo diario, existe una vanguardia que ya está experimentando con la física del porvenir, y, también, una retaguardia que, conscientemente, sigue en la senda que los lleva de regreso a la física antigua. El Teorema de Bell resulta importante, de manera especial, para los segundos. El que también en este libro se le conceda bastante importancia no significa que venga a aclarar ninguno de los problemas nuevos que en estos días nos plantea la física cuántica. Más bien lo que podría decirse es que el Teorema de Bell conduce a un punto de vista que no tiene nada de singular y que ya había sido aceptado por la mayor parte de los físicos: que la mecánica cuántica es, sobre todo, algo nuevo y diferente.

El Teorema de Bell, a este respecto, nos ayuda a establecer la diferencia existente entre una teoría *completa* que quiere estar en condiciones de predecirlo todo, como la que buscan los newtonianos (no parece que Newton fuera personalmente un auténtico newtoniano, puesto que deseaba que Dios, de vez en cuando, corrigiera el reloj del mundo para ponerlo en su hora exacta) y una teoría *maximal* que pronostica lo que es

posible, algo que ya predijeron los defensores de la mecánica cuántica. Pese a la existencia de esa controversia, Einstein y Bohr estaban de acuerdo, aunque en diferente forma, en que la mecánica cuántica está incompleta e, incluso, niegan que sea *maximal*. Lo que realmente debatían era si una teoría incompleta podría ser *maximal*. Durante su famosa controversia con Bohr, Einstein alegó:

—¡Bien, lo que ocurre es que nuestra teoría es demasiado pobre para poder ser experimentada!

Y Bohr replicó:

—¡No, no...! La experiencia es demasiado rica para nuestra teoría.

Es decir, se comportaban exactamente igual que los filósofos existencialistas que mientras unos se desesperan ante lo indeterminado de la vida y el hecho de que haya distintas posibilidades de elección, otros, en cambio, sienten que existe un *élan vital*.

Una de las cualidades características de la mecánica cuántica, que conduce a tal controversia, es su preocupación por lo no existente, por lo potencial. Hay algo de esto en todas las lenguas pues, si no, las palabras sólo podrían usarse una vez, pero la mecánica cuántica está mucho más relacionada que la mecánica clásica con las probabilidades. Algunos opinan que esta relación con lo posible en potencia, aunque aún no real, desacredita a la teoría del quántum y la hace inferior a la teoría maximal. Resulta importante destacar, en defensa de la teoría del quántum que, pese a su indeterminación, la mecánica cuántica puede ser expresada en términos de sí-o-no, cuando se refiere a individualidades —exactamente como hace la física clásica— y que las probabilidades pueden ser derivadas de estos experimentos como una ley de los grandes números y no necesita ser postulada.

Yo prefiero proclamar la diferencia entre las teorías clásicas y la del quántum, no como nos la presentan los libros de texto, sino como sigue: una vez que se ofrecen suficientes datos, la mecánica clásica puede dar una respuesta afirmativa o positiva, mientas que la mecánica cuántica simplemente deja sin respuesta, en su teoría, algunas cuestiones para que sean contestadas por la experiencia. Quiero señalar la lamentable tendencia —también en mí mismo— a pensar que la mecánica cuántica tiene que negar la existencia física de esas respuestas. Lo que hace es buscarlas en la experiencia y no en la teoría, como, por ejemplo, el *momento* de un electrón localizado. ¡Tan comprometidos estamos con nuestros sistemas de símbolos!

Después de una semana de charla y conversaciones, la Conferencia seguía trabajando con los elementos de la lógica del quántum y nunca llegó a alcanzar los nuevos conceptos cuánticos del tiempo que tratábamos de poner sobre el tapete. Pero facilitó el que llegáramos hasta la nueva serie de problemas que me ocupa en la actualidad. La mecánica cuántica está caracterizada por sus problemas sin respuesta. Algunos lógicos, como Martin Davis, han sugerido que esto podría tener relación con

las proposiciones que dominan la lógica desde los tiempos de Gödel y que se basan en la no decisión. En aquellos días yo creía saberlo todo mejor. Actualmente pienso que es posible que ellos sean los que tienen razón y que el elemento común sea la reflexibilidad y la imposibilidad de los sistemas finitos de alcanzar un total conocimiento de sí mismos. Aparentemente, un estudio apropiado de la humanidad es algo infinito. Confío en que esas ideas se desarrollen y que Gary Zukav escriba un libro sobre ellas. ¡Puede hacerlo muy bien!

David Finkelstein
Nueva York
Julio, 1978

INTRODUCCIÓN

Mi primer contacto con la física cuántica, tuvo lugar hace unos pocos años, cuando un amigo me invitó, una tarde, a una conferencia que tuvo lugar en el Laboratorio Lawrence Berkeley, en Berkeley, California.

En aquellos días, yo no mantenía relaciones con la comunidad científica, así que acudí a la reunión movido por el interés de ver cómo eran los físicos. Con gran sorpresa por mi parte descubrí dos cosas:

1. Que entendía todo lo que decían, y
2. Que su discusión se parecía mucho a una discusión teológica.

Me costaba trabajo creer lo que había descubierto. La física no era la asignatura aburrida y estéril que yo siempre había supuesto. Era una aventura profunda, rica, que se había convertido en inseparable de la filosofía. Resultaba increíble que nadie, con excepción de los propios físicos, se hubiera dado cuenta de esta notable evolución. A medida que aumentaban mi interés y mis conocimientos de física, me decidí a compartir mi descubrimiento con otras personas. Este libro es un regalo producto de ese descubrimiento. El primero de una serie de ellos.

Hablando en términos generales, la gente puede ser dividida en dos categorías de acuerdo con sus preferencias intelectuales.

El primer grupo prefiere un tipo de exploración intelectual que exige el rigor de los procesos lógicos; este tipo de personas son las que se interesan en las ciencias naturales y en las matemáticas. Estas personas no se hacen científicos a causa de su educación, sino porque ello premia su mentalidad científica.

El segundo grupo prefiere exploraciones que comprometen a su intelecto de manera menos rigurosa. Sus miembros tienen una mentalidad artística liberal no a causa de su educación, sino que escogen una educación en las artes liberales porque esto premia su inclinación mental por las artes liberales.

Dado que ambos grupos son inteligentes no existe dificultad para que cualquiera de los dos pueda entender lo que estudian los miembros del otro. Sin embargo, he descubierto un notable problema de *comunicación* entre los dos grupos. Muchas veces mis amigos físicos han intentado explicarme algún concepto y, en su exasperación, pasaban de una explicación

a otra y todas ellas sonaban (al menos para mí) abstractas, difíciles de captar y abstrusas en términos generales. Cuando finalmente lograba comprender lo que trataban de comunicarme, me sentía sorprendido, inevitablemente, al descubrir que la idea en sí resultaba realmente simple. Recíprocamente, con frecuencia he tratado de explicar a mis amigos físicos un concepto en términos que parecían (al menos para mí) laudablemente lúcidos pero que, para mi exasperación, a ellos les sonaban desesperadamente vagos, ambiguos y carentes de precisión. Confío que este libro será una *traducción* capaz de ayudar a esas personas que no tienen una mentalidad científica (como me ocurre a mí) suficiente para entender el proceso extraordinario que está teniendo lugar en la física teórica. Como cualquier traducción, nunca puede ser tan bueno como la obra original, desde luego, y está sujeto a las limitaciones del traductor. Para bien o para mal mi más importante cualificación como traductor es que, como tú, lector, tampoco yo soy un científico.

Para compensar mi falta de preparación en física (y mi mentalidad tendente a las artes liberales) he solicitado, y recibido, la asistencia de un extraordinario grupo de físicos (que están relacionados en mi nota de agradecimiento). Particularmente hay cinco de ellos que leyeron el manuscrito entero. A medida que iba completando cada uno de los capítulos, le enviaba copias de ellos a cada uno de los físicos y les rogaba que corrigieran cualquier error conceptual o fáctico que encontraran en él. (Varios otros físicos leyeron algunos capítulos especialmente elegidos).

Mi intención original fue utilizar sus comentarios para corregir el texto. Pronto descubrí que mis amigos científicos habían concedido al manuscrito más consideración de la que yo me había atrevido a esperar. Sus comentarios no sólo eran profundamente reflexivos y penetrantes sino que, tomados en conjunto, podrían formar un importante volumen de información por sí mismos. Mientras más profundamente estudiaba sus observaciones más me convencía de que era necesario que las compartiera con el lector. En consecuencia, además de corregir el texto de mi manuscrito con ellas, incluí como notas de pie de página aquellos comentarios que no duplicaban el texto corregido. En particular utilicé en esas notas los comentarios que estaban en desacuerdo con el texto y, también, con los comentarios de otros físicos. Al publicar, así, opiniones disidentes, he estado en condiciones de incluir numerosas ideas que, dentro del texto, hubieran alargado y complicado el libro. Desde el principio al fin, en *La danza de los Maestros* no se ha utilizado término alguno que no haya sido explicado inmediatamente antes o después de su empleo. Esta regla no ha sido seguida en las notas de pie de página, lo cual, si bien les da una *irrestringida* libertad de expresión, significa que las notas contienen términos que no han sido explicados antes, después o durante su uso. El texto respeta el estatuto del lector, de recién llegado a un campo amplio y excitante. Las notas a pie de página, no.

No obstante, si el lector lee esas notas al mismo tiempo que el texto, tendrá la oportunidad de enterarse de lo que tienen que decir sobre él cin-

co de los más destacados físicos del mundo y es como si éstos estuvieran leyendo el libro al mismo tiempo que el lector. Mucho mejor de lo que podría explicarse con palabras mías, esas notas revelan la precisión agresiva con que los hombres de ciencia tratan de subrayar y corregir los errores contenidos en la obra de un colega, incluso cuando se trate de uno con tan escasa preparación como yo y de una obra no-técnica como ésta.

La «nueva física», tal y como es utilizada en este libro, significa *mecánica cuántica,* que comenzó con la teoría de los quanta en 1900, y *relatividad,* que comenzó con la teoría de la relatividad de Albert Einstein en 1905. La vieja física es la física de Isaac Newton, descubierta por él hace unos trescientos años. «Física clásica» significa todo tipo de física que intente explicar la realidad de tal modo que para cada elemento de la realidad física haya un elemento correspondiente en la teoría. Por consiguiente, la «física clásica» incluye la física de Newton y la relatividad, puesto que ambas están estructuradas en esta misma forma proporcional de uno a uno. No incluye, por el contrario, a la mecánica cuántica, lo cual, como veremos, es una de las cosas que hacen única a la mecánica cuántica.

El lector debe ser amable consigo mismo mientras lee. Este libro contiene muchos relatos polifacéticos y muy interesantes, pero todos ellos son de contenido denso. No se pueden aprender de una vez, del mismo modo que tampoco se pueden captar de una sola vez todos los relatos que se nos cuentan en *Guerra y Paz, Crimen y Castigo* o *Los Miserables.* Sugiero al lector que lea este libro por placer y no para aprender lo que en él se contiene. Al final del libro hay un índice onomástico completo y otro de materias. Utilizado ambos puede volverse a cualquier tema que haya despertado especial interés. Y lo que es más: gozando con la lectura del libro, el lector recordará más que si lo hubiese leído con la intención de aprender todo lo que en él se dice.

Una última observación: éste no es un libro sobre física y filosofía oriental. Pese a que el marco poético de *Wu Li* podría conducir a esa comparación, se trata de un libro sobre la física cuántica y la relatividad. En el futuro espero escribir otro libro sobre física y Budismo. Tomando en consideración el aroma oriental de *Wu Li* he incluido en la obra esas similitudes entre la filosofía oriental y la física que me parecieron tan obvias y significativas y que me hicieron pensar que le haría un menguado servicio al lector si no las mencionaba de pasada.

¡Feliz lectura!

Gary Zukav
San Francisco
Julio, 1978

La mayor parte de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general, pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos.

ALBERT EINSTEIN[1]

Incluso para el físico, la descripción en un lenguaje normal y sencillo servirá de criterio para juzgar el grado de comprensión que ha sido alcanzado.

WERNER HEISENBERG[2]

Si a largo plazo uno no puede explicar a todo el mundo lo que ha estado haciendo, su trabajo carecerá de valor.

ERWIN SCHRÖDINGER[3]

¿WU LI?

UNA GRAN SEMANA EN GRAN SUR

Cuando les digo a mis amigos que estudio física, mueven la cabeza de un lado a otro, agitan sus manos con excitación y silban: «¡Vaya...! ¡Qué difícil...!» Esta reacción universal ante la palabra física es como un muro que se alza entre lo que hacen los físicos y lo que la mayor parte de la gente cree que hacen los físicos. Y, por lo general, hay una enorme diferencia entre ambas cosas.

En parte, los propios físicos son culpables de esa triste situación. Sus conversaciones profesionales suenan como griego adelantado para todos aquellos que no sean griegos o físicos. Cuando no hablan con sus colegas, los físicos hablan su idioma natal. Pero si se les pregunta en qué trabajan sus palabras vuelven a sonar como las de los nativos de Corfú.

Pero, por otra parte, la culpa también es nuestra. En términos generales hemos renunciado a comprender lo que hacen realmente los físicos (o los biólogos, etc., etc.). Con esta actitud nos hacemos un flaco servicio, pues esas personas están involucradas en aventuras extremadamente interesantes que no son tan difíciles de entender. Es el *cómo* lo hacen, que en muchas ocasiones implica una explicación técnica, lo que puede producir un profundo sueño involuntario si el que la oye no es un experto. Pero *lo que* hacen los físicos es realmente bastante sencillo. Se preguntan de qué está hecho el universo, cómo funciona y a dónde va, si es que va a alguna parte. En resumen: hacen lo mismo que nosotros en la noche estrellada cuando alzamos los ojos, nos extasiamos contemplando la inmensidad del universo, nos sentimos sobrecogidos por su grandeza y, al mismo tiempo, como parte de él. Esto es lo que hacen los físicos, ¡y los muy pícaros se hacen pagar por ello!

Desgraciadamente, cuando la mayor parte de la gente piensa en la «física», se imagina grandes pizarras cubiertas con los signos indescifrables de unas matemáticas desconocidas. La verdad, sin embargo, es que la física no es matemáticas. En esencia la física es simple: la pregunta, asombrada, de cómo son las cosas y el divino (algunos lo llaman inevitable) interés en saber por qué son como son. Las matemáticas son la herramienta de la física. Desnuda de las matemáticas la física se convierte en un puro arte de encantamiento.

Yo había hablado frecuentemente con Jack Sarfatti, un físico que es director del «Physics/Conscieusness Research Group», sobre la posibilidad de escribir un libro, libre de tecnicismo y matemáticas, para explicar las excitantes intenciones que motivan la física. Así cuando me invitó a una Conferencia sobre física, que Michael Murphy y él estaban organizando en el Instituto de Esalen, tuve un buen motivo para aceptar.

El Instituto de Esalen (que debe su nombre al de una tribu india) está situado en el norte de California. La costa del norte de California es toda ella una asombrosa mezcla de grandeza y belleza, sobre todo a lo largo de la autopista de la Costa del Pacífico entre las localidades de Big (Gran) Sur y San Luis Obispo. Los locales del Instituto de Esalen se encuentran a media hora de distancia al sur de Big Sur, entre la autopista y las montañas de la costa, por un lado, y los abruptos arrecifes que se alzan sobre el Océano Pacífico por el otro. Un riachuelo juguetón separa una tercera parte de los terrenos del Instituto del resto. En ese lado hay una casa grande (llamada la Casa Grande) donde son alojados los invitados, junto a una casa pequeña donde reside, con su familia, Dick Price (cofundador de Esalen con Murphy). Al otro lado del río hay un local donde se sirven las comidas y se celebran las reuniones, y donde se encuentran los alojamientos de otros invitados y del personal del Instituto, así como unos baños sulfúricos calientes.

Las comidas en Esalen constituyen una experiencia multidimensional. Los elementos que la componen son: la luz de las velas, alimentos orgánicos y una naturalidad contagiosa que forma la esencia de la experiencia de Esalen. Sarfatti y yo nos sentamos junto a dos jóvenes que ya habían empezado a comer. Uno de ellos era David Finkelstein, físico de la Universidad de Yeshiva (en Nueva York) que asistía a la conferencia. El otro era Al Chung-liang Huang, Maestro de T'ai Chi, que dirigía un taller en Esalen. No podíamos haber elegido mejor compañía.

Pronto la conversación versó sobre la física.

—Cuando yo estudiaba física en Taiwan — dijo Huang — la llamábamos Wu Li. Eso significa «Modelos de Energía Orgánica».

Todos los que nos sentábamos a la mesa quedamos impresionados inmediatamente por la imagen. Relampaguearon luces mentales, poco a poco, a medida que la idea iba entrando en nosotros. «Wu Li» era algo más que una imagen poética. Era la mejor definición de la física que se obtendría en aquella conferencia. Abarcaba ese algo, esa cualidad viva que estábamos tratando de expresar en un libro: eso sin lo cual la física se convierte en algo estéril.

—¡Escribamos un libro sobre Wu Li! — me oí decir a mí mismo. Inmediatamente las ideas y la energía comenzaron a brotar y, de un solo golpe, todos los planes realizados hasta entonces fueron arrojados por la borda. De ese fluir de energía surgió la imagen de la danza de los maestros de Wu Li. Los días que todavía tenía que pasar en Esalen, y los que les siguieron, fueron dedicados a descubrir qué eran los Maestros de Wu Li y por qué bailaban. Todos nosotros sentimos, con excitación y certeza,

que habíamos descubierto el canal por el que habrían de llegar, deslizándose sobre sus aguas, todas las cosas importantes que deseábamos decir sobre la física.

La lengua china no utiliza un alfabeto semejante al de los idiomas occidentales. En chino, cada palabra es representada por un carácter o ideograma que es un dibujo lineal. Los ideogramas no son simplemente símbolos abstractos, sino que visualmente reflejan el significado de la palabra que representan. (En ocasiones dos o más ideogramas se combinan para expresar distintos significados.) Ésa es la razón por la cual resulta tan difícil traducir el chino. Una buena traducción requiere un traductor que sea, al mismo tiempo, poeta y lingüista.

Por ejemplo: «Wu» significa, indistintamente, «materia» o «energía». «Li» es una palabra muy rica en contenido poético. Significa «orden universal» o «ley universal». Pero también «modelos orgánicos». Las vetas en un panel de madera son Li. El dibujo orgánico de una hoja es Li, como lo es la textura de un pétalo de rosa. En resumen, Wu Li, la palabra china para decir física, significa «modelos de energía orgánica» («materia-energía» [Wu] + «orden universal/modelos orgánicos» [Li]). Esto resulta notable puesto que refleja un punto de vista sobre el mundo que, simplemente no abarcaron los fundadores de la ciencia occidental (Galileo y Newton), pero hacia el cual parece señalar, realmente, cualquiera de las teorías físicas importantes del siglo xx. La cuestión no es «¿Conocen ellos algo que no sabemos nosotros», sino «¿Cómo lo saben?»

En las lenguas occidentales las palabras no suelen cambiar su significado al variar la entonación con que se las pronuncia. En lengua china eso no ocurre así. Muchas sílabas chinas pueden ser pronunciadas de manera diferente, con distintas entonaciones. Cada pronunciación diferente es una palabra diferente que se escribe de distinta manera y tiene su propio significado. En consecuencia, la misma sílaba pronunciada con inflexiones distintas, entonaciones que a oídos occidentales apenas resultan perceptibles, constituyen palabras distintas, cada una de las cuales tiene su ideograma y su significado propios para el oyente chino. En la mayor parte de los idiomas occidentales, que son atónicos, estos ideogramas son escritos y pronunciados del mismo modo.

En chino, por ejemplo, hay cinco «Wu»'s diferentes, todos los cuales son pronunciados y escritos del mismo modo en un idioma occidental. Cuando esos cinco «Wu»'s se combinan con «Li», el resultado es cinco «Wu Li»'s con la misma pronunciación y la misma ortografía en un idioma occidental, pero que son distintos por completo en chino.

El primer Wu Li, puede traducirse por «Modelos de energía orgánica», que es la forma como los chinos llaman a la física. (En este caso Wu significa «materia» o «energía».)

En el segundo de los casos Wu Li significa «Mi senda». (En este caso Wu significa «mío» o «yo mismo».)

El tercer Wu Li vendría a expresar «insensatez». (Wu significa aquí

«vacío», «vacante» o «no-ser».)

El cuarto Wu Li indica: «Me aferro a mis ideas.» (Wu en este caso es «cerrar las manos para formar un puño» o «apretar cerrando la mano».)

El quinto Wu Li quiere decir «iluminación». (Wu significa aquí «ilustración» o «mi corazón/mi mente».)

Si nos colocamos detrás de un maestro tejedor cuando empieza a trabajar en su telar, al principio no veremos ningún tejido, sino una gran diversidad de distintos hilos coloreados, entre los cuales, con ojo de experto, busca y selecciona los que debe colocar en su lanzadera móvil. Pero si continuamos mirando veremos como los hilos se combinan unos con otros, va apareciendo el tejido y, con él, un dibujo, un modelo previamente establecido.

De modo similar Al Huang ha logrado crear un bello y significativo tapiz, utilizando su propio telar epistemológico:

FÍSICA = WU LI

Wu Li = Modelos de Energía Orgánica
Wu Li = Mi senda
Wu Li = Insensatez
Wu Li = Me aferro a mis ideas
Wu Li = Iluminación

Todos los físicos asistentes a la conferencia, como una sola persona, apreciaron la resonancia de esta rica y expresiva metáfora. En ella, por fin, estaba el vehículo con el cual podíamos presentar los elementos germinales de la física superior. Al finalizar la semana, todos los que estábamos en Esalen hablábamos de Wu Li.

Al mismo tiempo que ocurría esto yo trataba de descubrir qué es un «Maestro». El diccionario no me ayudaba en absoluto. Todas sus definiciones contenían un elemento de control y eso no se acoplaba fácilmente con nuestra imagen de la *danza de los Maestros* de Wu Li. Puesto que Al Huan era un Maestro de T'ai Chi, se lo pregunté a él.

—Ésa es la palabra que los demás usan para describirme — me dijo.

Para Al Huang, Al Huang no era más que Al Huang.

Poco después, en esa misma semana, le hice de nuevo la misma pregunta, con la esperanza de que me diera una respuesta más tangible.

La contestación que obtuve en esa ocasión fue:

—Un maestro es alguien que comenzó antes que uno.

Mi educación occidental me imposibilitaba para aceptar una no-definición para mi deseada definición de Maestro, así que comencé a leer el libro de Al Huang, *Embrace Tiger, Return to Mountain.* Allí, en el prólogo escrito por Alan Watts, en el párrafo en el que describía a Al Huang, hallé lo que estaba buscando. Alan Watts decía, refiriéndose a Al Huang:

«Comienza por el centro, nunca por los bordes. Ofrece una definición de los principios básicos del Arte antes de entrar en detalles meticulosos. Se niega a degradar a los movimientos t'ai chi, dándoles un estilo de instrucción a lo militar, un marcar el paso (un-dos, un-dos), así como a convertir al estudiante en un robot. El sistema tradicional... consiste en enseñar maquinalmente, de memoria, y en dar la impresión de que largos períodos de aburrimiento son la parte más importante de la instrucción. Con este sistema se consigue, únicamente, que el estudiante se pase años y años sin llegar a sentir lo que está haciendo.[1]

Ésta era, exactamente, la definición del Maestro que yo estaba buscando. Un Maestro enseña la esencia de las cosas. Después que esa esencia es percibida, pasa a enseñar lo que cree necesario para extender la percepción. El Maestro de Wu Li no hablará de la gravedad, por ejemplo, hasta no haber visto a sus estudiantes observar interesados la caída del pétalo de una rosa. Ni se refiere a las leyes que rigen este fenómeno hasta que el estudiante, tras haber oído su explicación, se asombra en ello por sí mismo y comenta:

—¡Qué extraño! Dejo caer dos piedras, simultáneamente, una pesada y otra ligera y las dos llegan al suelo en el mismo momento...

No le hablará de matemáticas hasta que el estudiante, tras haber escuchado la explicación de las leyes de la gravedad, le diga:

—¡Pero tiene que haber un modo de explicar eso de manera más sencilla!

De ese modo el Maestro de Wu Li baila con sus estudiantes. El Maestro de Wu Li no enseña, pero sus estudiantes aprenden. El Maestro de Wu Li comienza, siempre, por el centro, por el meollo de la materia. Éste será el sistema que adoptaremos en este libro. Está escrito para gente inteligente que quiere saber física superior pero que ignora su terminología y, quizá, también, sus matemáticas. *La danza de los Maestros* es un libro que trata de lo esencial de las cosas. Trata de la esencia de la mecánica cuántica, de la relatividad especial, de la relatividad general y de algunas otras nuevas ideas que parecen indicar la dirección en la cual la física intenta moverse. Desde luego, ¿cómo podemos saber a dónde nos lleva el futuro? No podemos conocerlo. Lo único seguro es que eso que pensamos hoy, mañana será, ya, parte del pasado. Por consiguiente, este libro no tratará del conocimiento — que siempre será un verbo conjugado en pretérito — sino de la imaginación. Así tendremos una física que adquiere vida, así es Wu Li.

Uno de los más grandes físicos de todos los tiempos, Albert Einstein, que quizá fue un Maestro de Wu Li, escribió en 1938:

«Los conceptos físicos son creaciones libres de la mente humana, y no están, aunque pueda parecerlo, determinados en forma única por el mundo exterior. En nuestro esfuerzo por comprender la

realidad somos algo así como un hombre que tratara de entender como funciona un reloj encerrado en su caja. Ve la esfera, las agujas que se mueven y hasta puede ser que escuche su tic-tac, pero no tiene los medios para abrir la caja. Si se trata de un hombre de ingenio, puede formarse una idea del mecanismo responsable de todas las cosas que está viendo, pero nunca podrá estar seguro de que el modelo, la imagen que se formó en su mente, sea la única capaz de explicar las cosas que está observando. Nunca podrá estar en condiciones de comparar el mecanismo real con la imagen que él se ha formado y ni siquiera imaginar las consecuencias de tal comparación.»[2]

Mucha gente cree que los físicos están explicando el mundo. Algunos físicos parecen creerlo también; pero los Maestros de Wu Li saben que no hacen otra cosa sino danzar con él.

Le pregunté a Huang cómo estructuraba sus clases. Su respuesta fue:

—Cada lección es la primera. Cada vez que bailamos lo hacemos por vez primera.

—Pero, ciertamente, usted no puede volver a empezar de nuevo con cada lección — le argumenté —. La lección segunda tiene que estar basada en lo que usted enseñó en la primera. Y lo mismo la lección tercera sustentarse en la lección primera y en la lección segnuda, y así sucesivamente.

—Cuando digo que cada lección es la primera lección — replicó —, no quiero decir que eso signifique que olvidemos lo que ya sabemos. Lo que quiero decir es: lo que estamos haciendo es nuevo, porque siempre que hacemos algo lo hacemos por primera vez.

Ésta es otra de las características del Maestro. Cualquier cosa que haga la hará siempre con el mismo entusiasmo con que se hacen las cosas por primera vez. Y ésta es la fuente de su energía ilimitada. Cualquier lección que enseñe (o que aprenda) será una lección nueva, una primera lección. Toda danza que baile, la baila por primera vez: siempre es algo nuevo, personal y vivo.

Isidor I. Rabi, Premio Nobel de Física, ex director del Departamento de Física de la Universidad de Colombia, escribió:

«No enseñamos a nuestros estudiantes lo suficiente sobre el contenido intelectual de los experimentos... ni su novedad, ni su capacidad de abrir nuevos campos... Mi punto de vista es que nos tomamos estas cosas de manera individualista, particular. Se realiza un experimento porque nuestra filosofía personal nos hace desear conocer el resultado. Quizá olvidamos que todo es demasiado duro y la vida demasiado corta para pasar el tiempo haciendo algo simplemente porque alguien nos dice que es importante. Lo importante es sentir, íntimamente, lo que se está haciendo...»

Desgraciadamente, muy pocos físicos son como Rabi. La mayoría en realidad se pasan la vida *haciendo* lo que otras personas les han dicho que es importante y no lo que es importante para ellos. Esto es lo que Rabi deseaba expresar.

Pero esto nos lleva a un error de interpretación bastante corriente. Cuando la gente, en general, dice «científicos» lo que está diciendo es «técnicos». Un técnico es una persona altamente entrenada cuyo trabajo consiste en aplicar técnicas y principios que ya son conocidos. Un científico, por el contrario, es una persona que busca conocer la verdadera naturaleza de la realidad física. Trata con y de lo desconocido.

En resumen, el científico descubre y el técnico aplica lo ya inventado. Sin embargo, no está del todo claro si lo que hace el científico es descubrir cosas nuevas o las está creando por sí mismo. Mucha gente cree que el «descubrimiento» es un verdadero acto de creación. Si esto es cierto, la distinción entre científicos, poetas, pintores y escritores no está del todo clara. En realidad es muy posible que los científicos, los poetas, los pintores y los escritores sean todos miembros de una misma familia de seres humanos cuyo don natural es tomar esas cosas que llamamos lugares comunes y *re-presentárnoslas* de manera que logren que se expandan los límites que nos hemos impuesto. Las personas que tienen ese don especialmente desarrollado son aquellas a las que llamamos genios.

La verdad es que la mayor parte de los «científicos» son simplemente técnicos. No están interesados en lo esencialmente nuevo. Su campo de visión es relativamente angosto; sus energías están dirigidas hacia la aplicación de algo que ya es conocido. Por lo corriente meten sus narices bajo la corteza de un árbol determinado y, por esa razón, les resulta difícil hablar, con sentido, del bosque. El caso del misterioso espectro del hidrógeno ilustra la diferencia entre científicos y técnicos.

Cuando una luz blanca, como por ejemplo un rayo de sol, atraviesa un prisma de cristal, se produce uno de los más bellos fenómenos. Al otro lado del prisma no sale luz blanca sino que aparecen todos los colores del arco iris, desde el rojo oscuro al violeta claro, con naranja, amarillo, verde y azul entre ellos. Esto se debe a que la luz blanca está formada de todos esos distintos colores. Es una combinación en la cual la luz roja contiene sólo luz roja, la luz verde únicamente verde, etc., etc. Isaac Newton escribió hace trescientos años su famosa *Optiks,* que describe detalladamente este fenómeno.

Esa exhibición de colores se llama espectro de la luz blanca. El análisis espectroscópico de la luz blanca muestra un espectro completo porque la luz blanca contiene en sí todos los colores que pueden ser vistos por nuestros ojos (y algunos que no pueden verse, como los infrarrojos y los ultravioletas).

Sin embargo, ningún análisis espectroscópico produce un espectro completo. Si tomamos uno de los elementos químicos, por ejemplo el sodio, y hacemos que emita luz y que esa luz atraviese un prisma de cristal, sólo

conseguiremos una *parte* del espectro completo.

Si un objeto es visible en el interior de una cámara oscura está emitiendo luz. Si a nuestros ojos aparece de color rojo, por ejemplo, está emitiendo luz roja. La luz es emitida por objetos «excitados». Excitar un trozo de sodio no significa regalarle una entrada de tribuna para que asista a una final de la Copa. Excitar un trozo de sodio quiere decir añadirle alguna cantidad de energía. Una de las formas de hacerlo es calentándolo.

Cuando hacemos cruzar a través de un prisma de cristal, o de un espectroscopio, la luz emitida por el sodio excitado (incandescente) no conseguimos una muestra completa de los colores característicos de la luz blanca, sino sólo *una parte de ellos*. En el caso del sodio obtendríamos dos delgadas líneas amarillas.

Podemos conseguir una imagen negativa del espectro del sodio haciendo pasar un rayo de luz blanca a través de una nube de vapor de sodio, para ver qué componentes de la luz blanca son absorbidos por el vapor de sodio. La luz blanca que atraviesa el vapor de sodio y que después hacemos pasar a través del espectroscopio, produce todos los colores del arco iris menos las dos líneas amarillas emitidas por el sodio incandescente.

Mediante cualquiera de esos dos procesos observamos que el espectro del sodio produce siempre una imagen exclusiva, distintiva. Puede estar compuesta por líneas negras sobre un espectro completo de los colores componentes de la luz blanca, o por dos líneas amarillas sin que aparezca ningún otro color del espectro. De todos modos, en ambos casos, cada uno de los respectivos modelos, o imágenes, será siempre el mismo. Esas imágenes, esos modelos, son como la huella dactilar del elemento sodio.

Cada elemento emite (o absorbe) únicamente unos colores específicos. Como consecuencia de ello, cada elemento produce imágenes espectroscópicas específicas que no varían nunca en absoluto.

El hidrógeno es el elemento más simple. Parece tener solamente dos componentes: un protón, que tiene carga eléctrica positiva y un electrón que tiene una carga negativa. Debemos decir que «parece tener», porque nadie ha visto nunca un átomo de hidrógeno. De existir los átomos de hidrógeno, millones de ellos podrían tener cabida en una cabeza de alfiler, tan pequeños se calcula que son. Los átomos son una especulación, como la que haría quien quisiera adivinar lo que hay dentro de la caja del reloj. Podemos decir que la existencia de esas entidades explica, adecuadamente, ciertas observaciones que serían muy difíciles de explicar de otro modo, si prescindimos de explicaciones tales como «el diablo lo hizo», lo cual también es posible. (Es el tipo de explicación que llevó a Galileo, a Newton y a Descartes a crear lo que ahora conocemos como ciencia moderna.)

En un tiempo los físicos pensaron que los átomos estaban construidos del siguiente modo: en el centro del átomo hay un núcleo, exactamente igual que el sol está en el centro de nuestro sistema solar. En el núcleo se localiza casi toda la masa del átomo, en forma de partículas con carga positiva (protones) y de otras partículas de un tamaño casi igual al de los protones pero sin ningún tipo de carga eléctrica (neutrones). (Únicamente el

hidrógeno carece de neutrones en su núcleo.) Orbitando en torno al núcleo, como los planetas giran alrededor del sol, están los electrones, que casi no tienen masa si se les compara con el núcleo. Cada electrón tiene una carga negativa. El número de electrones es siempre el mismo que el número de protones, de manera que las cargas respectivas, positivas y negativas, se anulan unas a otras y así resulta que el átomo, considerado como un todo, carece de carga.

La dificultad, al comparar este modelo de átomo con nuestro sistema solar, estriba en que la distancia entre el núcleo de un átomo y sus electrones es enormemente mayor de lo que nosotros representamos las distancias entre el sol y sus planetas. El espacio ocupado por un átomo es tan enorme, comparado con la masa de sus partículas (la mayor parte de la cual está en el núcleo) que los electrones que giran en torno al núcleo son «como unas cuantas moscas en el interior de una catedral», según afirmó Ernest Rutherford, que creó ese modelo del átomo allá por el año 1911.

Ésa que hemos descrito es la imagen familiar del átomo que aprendimos, la mayor parte de nosotros, en la escuela, generalmente a costa de mayor dificultad y desencanto que placer. Desgraciadamente, en la actualidad, esa imagen se ha quedado obsoleta, pasada, así que lo mejor que podemos hacer es olvidarnos de ella. Ya discutiremos, posteriormente, lo que los físicos piensan en la actualidad acerca del átomo.

En esta exposición, de momento, el punto interesante es que el modelo planetario del átomo sirvió de base para la resolución de un intrigante problema.

¡El espectro del hidrógeno, el más sencillo de los átomos, contiene más de cien líneas! Los espectros de otros elementos son aún más complicadas. Cuando hacemos pasar por un espectroscopio la luz procedente del hidrógeno gaseoso sometido a excitación, obtenemos más de cien líneas de color diferentes, que forman un espectro inconfundible.* La cuestión es: «¿Cómo algo tan simple como es un átomo de hidrógeno, con sólo dos componentes, un protón y un electrón, puede ser causa de un espectro tan complejo?»

Una de las formas de representarnos mentalmente la luz consiste en atribuirle propiedades semejantes a las que tienen las ondas. Así podríamos decir que a cada uno de sus distintos colores se corresponden diferentes frecuencias, como ocurre con los distintos sonidos, que también son ondas.

Arnold Sommerfield, un físico alemán que fue al mismo tiempo consumado pianista, hizo la observación de que los átomos de hidrógeno, que emitían más de cien frecuencias distintas, tenían que ser más complicados que los pianos de cola ¡que únicamente emitían ochenta y ocho frecuen-

* Hablando con propiedad, conviene decir que para fotografiar cada serie del espectro del hidrógeno se requiere un equipo experimental diferente. Consecuentemente otras fotografías más simples del espectro del hidrógeno solamente nos muestran unas diez líneas. En teoría existe un número infinito de líneas en cada espectro atómico. Más aún: en realidad, teóricamente, hay un número infinito de líneas en cada serie de cada espectro, porque las líneas de más alta frecuencia de cada serie están tan poco separadas entre sí que forman un continuo.

cias distintas!

Fue un físico danés, Niels Bohr, quien en 1913 nos ofreció una explicación que tenía tanta lógica como para hacerle ganar el Premio Nobel. Como la mayor parte de las ideas en física, la de Bohr resultaba sencilla en lo esencial. El físico danés comienza no con lo que ya nos era *conocido* «teóricamente» sobre la estructura del átomo, sino con lo que él realmente *sabía* sobre la estructura del átomo gracias a los datos espectroscópicos y nada más. Bohr, a partir de eso, especuló con la idea de que los electrones que giraban en torno al núcleo no lo hacían a distancias determinadas por el azar, sino en órbitas o capas concéntricas situadas a distancias específicas del núcleo. Cada una de esas órbitas (teóricamente existe un número infinito de ellas) contiene hasta un cierto número de electrones, pero ni uno más.

Si el átomo tiene más electrones de los que pueden acomodarse en la primera órbita, éstos comienzan a llenar la segunda de las órbitas. Si el átomo tiene un mayor número de electrones que pueden contener la primera y la segunda órbita combinadas, comienza a ocuparse la tercera órbita, y así sucesivamente con esta relación:

Número de la órbita	1	2	3	4	5 ...
Número de electrones	2	8	18	32	50 ...

Los cálculos de Bohr estuvieron basados en el átomo de hidrógeno, que tiene un solo electrón. De acuerdo con la teoría de Bohr, en el átomo de hidrógeno el electrón está todo lo cerca del núcleo que le es posible. En otras palabras: por lo general se encuentra en la primera de las capas. Éste es el estado más bajo de energía de un átomo de hidrógeno (los físicos llaman a ese estado más bajo de energía de cualquier átomo su «estado fundamental»). Si excitamos a un átomo de hidrógeno hacemos que su electrón salte a otra órbita, más exterior. La distancia de este salto dependería de la cantidad de energía que le hayamos añadido. Si calentamos fuertemente al átomo (energía térmica) haremos que su electrón dé un salto muy largo y llegue a alcanzar una de las capas exteriores. Con cantidades menores de energía conseguiremos saltos más cortos. Consecuentemente, el electrón tratará de regresar a una capa más cercana al núcleo tan pronto como le sea posible (cuando dejemos de calentarlo). Si la reducción de energía es considerable el electrón volverá a colocarse en la primera capa. Siempre que un electrón salta de una capa externa a otra situada más cerca del núcleo emite energía en forma de luz. La cantidad de energía emitida por el electrón es exactamente la misma que absorbió cuando saltó anteriormente hacia la capa exterior. Bohr descubrió que el número de las combinaciones de saltos posibles que el electrón del hidrógeno puede hacer en su viaje de regreso al estado fundamental (es decir, a su primera capa) es igual al número de líneas en el espectro del hidrógeno.

Ésta es la famosa solución que Bohr ofreció al misterio del piano de cola. Si el electrón, en un átomo de hidrógeno, hace el recorrido completo

desde una capa externa a la más interna de ellas en un solo salto emite una cierta cantidad de energía. Esto producirá otra línea en el espectro del hidrógeno. Si el electrón da un pequeño salto (de una capa exterior a la interior más próxima) hacia el centro, perderá una parte más pequeña de energía. Esto producirá otra línea en el espectro. Si el electrón de un átomo de hidrógeno salta de la capa cinco a la tres, por ejemplo, eso dará origen a una nueva línea. Un nuevo salto de la capa seis a la cuatro y otro desde la cuatro a la una, formarán dos líneas espectrales más y así sucesivamente. De este modo podríamos seguir hasta explicar el espectro completo del hidrógeno.

Si excitamos un átomo de hidrógeno con una luz blanca, en vez de con calor, podemos producir el fenómeno de absorción que ya hemos mencionado anteriormente. Cada electrón saltará de una capa interna a otra situada más lejos del núcleo, o sea más externa, y cada uno de esos saltos requerirá una cantidad de energía determinada, ni mayor ni menor. Un electrón que salta de la capa uno a la capa dos requiere una determinada cantidad de energía y sólo esa cantidad. Lo mismo es cierto para un salto de la capa cinco a la capa siete, etc. Cada salto que haga el electrón de una capa interior a otra exterior requiere otra específica cantidad de energía, y y sólo aquélla.

Al iluminar un átomo de hidrógeno con luz blanca lo que hacemos es ofrecerle todo un supermercado lleno con distintas cantidades de energía. Sin embargo, no estará en condiciones de usar toda la que nosotros podemos ofrecerle sino, solamente, cierta cantidad precisa. Si su electrón salta de la capa uno a la capa cuatro, por ejemplo, tomará un determinado paquete de energía de los que hay en esos estantes llenos que hemos puesto a su disposición. El paquete que toma deja un vacío en el estante, es decir, se convierte en una línea negra en el espectro (por lo demás completo) de la luz blanca. Un salto de la capa tres a la capa cuatro se convierte en otra línea negra; de la capa uno a la capa dos y después a la capa seis (se puede dar todo tipo de combinaciones) producirá otras dos líneas negras más.

En suma, si emitimos luz blanca a través de una nube de hidrógeno gaseoso y después la hacemos pasar por un prisma de cristal el resultado es el familiar espectro de la luz blanca pero con algo así como un centenar de líneas negras en él. Cada una de esas líneas negras corresponde a una específica cantidad de energía que fue necesaria para hacer que un electrón de hidrógeno saltara desde una capa a otra más alejada del núcleo.

Estas líneas negras en el espectro de la luz blanca forman, exactamente, el mismo espectro, la misma imagen que obtenemos cuando hacemos pasar directamente por un prisma la luz emitida por el hidrógeno gaseoso excitado, excepto que a la inversa: en este caso las líneas no son negras sino coloreadas y el resto del espectro de la luz blanca desaparece. Naturalmente esas líneas de color son causadas por los electrones que regresan a las capas más internas y, en ese proceso, emiten cantidades de energía iguales a las que absorbieron cuando hicieron su salto anterior en dirección opuesta. La teoría de Bohr permite a los físicos calcular las frecuen-

cias de la luz emitida por los sencillos átomos del hidrógeno. Esos cálculos coinciden con las observaciones. ¡El misterio del piano de cola estaba resuelto!

Poco después de que Bohr publicara su teoría en 1913 un ejército de físicos comenzó la obra de aplicar su teoría a otros elementos. El procedimiento resulta realmente complicado cuando se trata de átomos con un mayor número de electrones. Desde luego no se pudo hallar respuesta a todas las preguntas que se hacían los físicos sobre la naturaleza de los fenómenos atómicos, y sin embargo este trabajo ayudó a que se consiguiera una notable cantidad de conocimientos nuevos.

La mayor parte de los físicos que se dedicaron a aplicar la teoría de Bohr, desarrollándola aún más en la práctica, eran *técnicos.* Pero Bohr, uno de los fundadores de la nueva física, era un *científico.*

Con esto no queremos decir que los técnicos no sean importantes. Los técnicos y los científicos componen un consorcio. Bohr no hubiera podido expresar su teoría sin el auxilio de los datos espectroscópicos que fueron puestos a su disposición y que eran el resultado de innumerables horas de trabajo en el laboratorio realizadas por los técnicos y que quedaban fuera de las posibilidades y la capacidad de trabajo personales de Bohr. Los técnicos consiguieron para él estos datos aplicando la teoría a otros elementos.

Los técnicos son miembros importantes de la comunidad científica. Sin embargo, dado que este libro trata de los Maestros de Wu Li y no de los técnicos, a partir de ahora utilizaremos la palabra «físico» para designar a los físicos científicos, es decir, aquellos que no están confinados en lo «conocido». Por lo poco que sabemos de los Maestros de Wu Li es evidente que provienen de este grupo, del de los físicos científicos.

Hay ciertas limitaciones que no pueden ser superadas por ningún libro de física. En primer lugar las cosas que hay que exponer son tantas que ni siquiera veinte volúmenes bastarían para contenerlo todo. Cada año se publica casi esa cantidad de material nuevo. Incluso los físicos más entregados a su profesión encuentran casi imposible mantenerse al día en todos los campos. Se requiere ya una amplísima dieta de lectura para poder estar al corriente de la actualidad en un único y determinado campo. Sobre cada uno de los temas que trataremos en estas páginas es mayor el exceso, la abundancia, que la escasez. No importa cuánto se aprenda sobre física: siempre habrá algo que será nuevo para uno. Éste es un problema que no sólo afecta a los legos en la materia, sino también a los físicos.

Segunda limitación: no es posible una apreciación directa y completa de la física sin las matemáticas. Pese a ello no hay matemáticas en *La Danza de los Maestros.* Las matemáticas constituyen una forma de pensar altamente estructurada. Y es así como los físicos ven al mundo. Uno de sus puntos de vista es que se debe imponer esta estructura sobre todo lo que ven. Otro punto de vista es que, mediante esas formas estructuradas, el mundo puede representarse a sí mismo de manera más completa. En todo

caso no hay duda de que las matemáticas son la expresión más concisa de la física. La razón que me llevó a escribir *La Danza de los Maestros* está en que la mayor parte de los físicos no se hallan capacitados para explicar bien la física sin usar las matemáticas. Esto los hace muy concisos, pero, desgraciadamente, ininteligibles para los que no poseen un buen caudal de conocimientos matemáticos. Y la verdad continúa siendo que la mayoría de nosotros usamos las palabras y no los números para nuestras explicaciones.

Resulta importante recordar que las matemáticas y el castellano no son más que lenguajes. Las lenguas son instrumentos muy útiles para facilitar información. Pero si pretendemos transmitirnos experiencias valiéndonos de ellos la cosa no resulta. Todo lo que las lenguas pueden hacer es que *hablemos* de una experiencia. Los Maestros de Wu Li saben que la descripción de una experiencia no es, desde luego, la experiencia en sí. Es sólo una charla sobre ella.

Este libro trata *de* la física. Sin embargo, todo lo que contiene es descripción. No abarca la experiencia en sí misma, lo que no quiere decir que el lector no pueda obtener la experiencia de la física con su lectura. Lo que quiere decir es que si el lector adquiere alguna experiencia, ésta provendrá de sí mismo y no del libro.

La mecánica cuántica, por ejemplo, nos enseña que nosotros no estamos separados del resto del mundo, como habíamos creído. La física de las partículas nos enseña que el «resto del mundo» no es algo que permanece ocioso «allá fuera». Por el contrario es un brillante campo de continua creación, de transformación y, también, de aniquilamiento. Las ideas de la nueva física pueden dar lugar a que se produzcan experiencias extraordinarias cuando son captadas en su totalidad. El estudio de la relatividad, pongamos por ejemplo, puede producir la notable experiencia de que espacio y tiempo son solamente construcciones mentales.

Cada una de estas experiencias logradas es capaz de cambiarnos de tal manera que nunca volveremos a ser capaces de contemplar el mundo como lo veníamos haciendo hasta ese momento.

No hay una «experiencia» de la física. La experiencia siempre está cambiando.

La relatividad y la mecánica cuántica, aunque se trate de algo generalmente desconocido para los que no son físicos, cuentan ya con más de medio siglo de existencia.

En la actualidad, todo el campo en el que actúa la física se mueve, late, palpita con anticipación en espera de acontecimientos sensacionales. Los físicos comparten la sensación, el sentir, de que está a punto de producirse un cambio radical en muchos aspectos. Aumenta el consenso en torno a la idea de que en un futuro muy próximo seremos testigos del nacimiento explosivo de nuevas ideas que se incorporarán a la escena donde ahora se mueven las antiguas teorías y nos brindarán una perspectiva mucho más amplia de nuestro universo, y por consiguiente, de nosotros mismos.

Los Maestros de Wu Li se mueven en medio de toda esa escena, palpitantes de emocionada anticipación, danzando de maneras muy diversas, a veces con un ritmo lento y más reposado, casi agobiado, y en otras ocasiones con mayor ligereza y gracia, como si se deslizaran libremente, flotando sobre una armoniosa corriente de paz. A veces los bailarines se convierten en el propio baile y otras es la danza la que se transforma en ellos. Éste es el mensaje de los Maestros de Wu Li: no confundir el tipo de danza que están bailando, con el hecho de que están bailando.

A EINSTEIN NO LE GUSTA

La mecánica cuántica no es el tipo de mecánica que se usa en el garaje del señor Cuanto para reparar los automóviles. La mecánica cuántica es una rama de la física. La física se divide en varias ramas. La mayor parte de los físicos opinan que pronto se construirá un compendio lo suficientemente amplio como para incluirlas a todas.

De acuerdo con ese punto de vista es posible que logremos desarrollar, en principio, una teoría capaz de explicarlo todo tan perfectamente que no quedará nada más que explicar. Eso no quiere decir, desde luego, que nuestra explicación refleje necesariamente las cosas tal y como son en la actualidad. Seguiremos sin estar en condiciones de poder abrir el reloj, como expresó Einstein, pero cualquier suceso ocurrido en el mundo *real* (dentro del reloj) se considerará como causa de su correspondiente elemento en nuestra superteoría final. De este modo conseguiremos por fin una teoría que sea consistente consigo mismo y que explique todos los fenómenos observables. Einstein llama a ese estado el «límite ideal del conocimiento».[1]

Esta forma de pensar nos lleva a la mecánica cuántica del mismo modo que el coche corre a estrellarse contra el proverbial muro de ladrillo. Einstein pasó una gran parte de su vida discutiendo contra la mecánica cuántica, pese a lo cual fue él uno de los que hizo importantes contribuciones a su desarrollo. ¿Por qué actuó así? Presentar esta cuestión es como situarse al borde del abismo, todavía pisando el suelo firme de la física newtoniana, pero ya con la mirada fija en el vacío. Responderla es precipitarse pesadamente en la nueva física.

* * *

La mecánica cuántica se abrió camino a la fuerza para hacer su aparición en escena a comienzo de este siglo. No hubo ninguna Convención de físicos que votara el comienzo de una nueva rama de la física llamada «mecánica cuántica». Ninguno tenía la menor elección en esa materia excepto, quizá, como llamarla.

Un «quanto» es una cantidad de algo, una específica cantidad. Mecá-

nica es el estudio del movimiento. Consecuentemente «mecánica cuántica» es el estudio del movimiento de las cantidades. La teoría del quanto dice que la naturaleza se presenta en porciones y pedazos (los quantos) y la mecánica del quanto es el estudio de ese fenómeno.

La mecánica cuántica no reemplaza a la física de Newton, sino que la incluye en su teoría. La física de Newton sigue siendo válida dentro de sus límites. Decir que hemos hecho un descubrimiento más amplio con relación a la naturaleza es sólo una cara de la moneda. La otra cara de la misma moneda sería decir que hemos encontrado el límite de nuestras previas teorías. Lo que realmente hemos descubierto es que la forma en que habíamos venido observando a la naturaleza no es lo suficientemente amplia y no abarca todo lo que sería necesario para explicar los fenómenos que podemos observar. Por consiguiente, nos vemos forzados a desarrollar un método más comprehensivo. En palabras de Einstein:

> «... crear una nueva teoría no consiste en destruir el viejo granero y levantar un rascacielos en su lugar. Es más bien como escalar una montaña, ganando perspectivas nuevas y más amplias, descubriendo contactos inesperados entre nuestro punto de partida y el rico paisaje que se revela a su alrededor. Pero el punto del que partimos sigue existiendo y puede ser visto, aun cuando aparezca más pequeño y haya pasado a ser una pequeña parte de nuestra más amplia perspectiva que hemos ganado al superar los obstáculos de nuestro camino, pleno de aventuras, hacia la cumbre».[2]

La física de Newton sigue siendo aplicable al mundo a gran escala, pero no tiene validez en el mundo subatómico. La mecánica cuántica es el resultado del estudio de ese mundo subatómico, de ese universo invisible que está por debajo, incluido en, y formando el tejido de todo lo que existe en torno a nosotros.

En la era de Newton (a finales del siglo XVII) ese mundo era enteramente una especulación. La idea de que el átomo es el ladrillo invisible con el que la naturaleza lo construye todo, había sido propuesta ya cuatrocientos años antes de Cristo, pero hasta el siglo XIX siguió siendo simplemente una idea. Los físicos desarrollaron la tecnología necesaria para observar los efectos de los fenómenos atómicos, con lo cual «probaron» que el átomo existía. Desde luego, lo que realmente probaron fue que la existencia teórica del átomo era la mejor explicación que podía inventarse en esos momentos para justificar los datos conseguidos experimentalmente. También probaba que los átomos no eran indivisibles sino que también ellos estaban hechos de partículas más pequeñas, como los electrones, protones y neutrones. Esas nuevas partículas fueron denominadas «partículas elementales» porque los físicos creyeron que, por fin, habían logrado descubrir el último ladrillo con el que se ha construido el universo.

La teoría de las partículas elementales es una versión reciente de una antigua idea griega. Para comprender la teoría de las partículas elementa-

les imaginémonos a una gran ciudad, construida de ladrillos. La ciudad está llena de edificios de todas formas y tamaños. Todos ellos, así como también las calles, han sido construidos con sólo unos pocos tipos diferentes de ladrillos. Si sustituimos «universo» por «ciudad» y «partícula» por «ladrillo», tenemos la teoría de las partículas elementales.

Ha sido el estudio de las partículas elementales lo que ha llevado a los físicos, en una carrera codo a codo, al descubrimiento más devastador (para un físico): *¡La física de Newton no es válida en el universo de lo infinitamente pequeño!* El impacto de este descubrimiento, capaz de sacudir la tierra como un terremoto, está modificando, todavía, nuestros puntos de vista sobre el mundo. Los experimentos realizados por la mecánica cuántica producen repetidamente resultados que la física de Newton no pudo predecir ni explicar. Sin embargo, si la física de Newton no tiene validez ni puede explicar los fenómenos que ocurren en el campo de lo microscópico, sigue explicándonos muy bien fenómenos macroscópicos (pese a que lo macroscópico está hecho de lo microscópico). Éste fue, probablemente, el descubrimiento más profundo de la ciencia.

Las leyes de Newton están basadas en observaciones de nuestro mundo cotidiano. Predicen sucesos. Estos sucesos pertenecen a cosas reales como balones de fútbol o bicicletas. La mecánica cuántica se basa en experimentos llevados a cabo en el mundo de lo subatómico. Predicen probabilidades. Esas probabilidades están relacionadas con los fenómenos subatómicos. Y éstos no pueden ser observados directamente. Ninguno de nuestros sentidos puede detectarlos.* No sólo nadie ha podido ver un átomo (y mucho menos un electrón), sino que nadie lo ha saboreado, tocado, oído u olido.

Las leyes de Newton se refieren a sucesos que son de fácil comprensión y sencillos de describir. La mecánica cuántica se refiere a las probabilidades de fenómenos que desafían su conceptualización y son imposibles de visualizar. Por tanto, estos fenómenos tienen que ser comprendidos de un modo que no resulte más difícil que nuestra forma usual de comprensión, pero diferente a ella. No debe intentarse formar un cuadro mental completo de los sucesos de la mecánica cuántica. (Los físicos construyen representaciones parciales de los fenómenos del quanto, pero incluso esas representaciones tienen un valor cuestionable.) En vez de ello el lector debe tratar de abrirse sin hacer el menor esfuerzo para visualizarlo todo. Werner Heisenberg, uno de los fundadores de la física cuántica, escribió:

> «Las leyes de la teoría del quanto, formuladas matemáticamente, muestran con claridad que nuestros conceptos intuitivos ordinarios no pueden ser aplicados ambiguamente a las partículas más pequeñas. Todas las palabras o conceptos que usamos para descri-

* El ojo adaptado a la oscuridad puede detectar un simple protón. Por lo demás, sólo los *efectos* de los fenómenos subatómicos son perceptibles por nuestros sentidos (la huella en una placa fotográfica, un movimiento en la aguja de un instrumento de medida o control, etc.).

bir objetos físicos ordinarios como posición, velocidad, color, tamaño, etc., se vuelven indefinidos y problemáticos si tratamos de usarlos aplicados a las partículas elementales.»[3]

La idea de que no podemos entender nada mientras no tengamos una representación de ello en nuestra mente es un subproducto del concepto newtoniano que empleamos para observar el mundo. Si queremos ir más allá de Newton tenemos que superar esa idea.

La primera gran contribución a la ciencia fueron las leyes del movimiento. Si un objeto — dijo Newton — se está moviendo en línea recta continuará moviéndose en línea recta hasta que actúe sobre él cualquier otra cosa (una fuerza). En esos momentos su dirección y velocidad será alterada y esta alteración dependerá de la intensidad y dirección de la fuerza que ha actuado sobre el objeto. Y algo más: toda acción está acompañada de una reacción igual y opuesta.

En la actualidad esos conceptos son familiares a todo aquel que haya estudiado física o que sea aficionado al juego del billar. Sin embargo, si mentalmente nos autoproyectamos trescientos años atrás, en el pasado, podremos darnos cuenta de cuán notables son realmente estas ideas.

En primer lugar veríamos que la primera ley newtoniana del movimiento desafiaba a la autoridad reconocida de esos días, que era la de Aristóteles. De acuerdo con Aristóteles, la inclinación natural de un objeto en movimiento era regresar al estado de inmovilidad.

Segundo, las leyes de movimiento de Newton describen sucesos que eran inobservables en el siglo XVII. En el mundo cotidiano, que era todo lo que Newton tenía que observar, los objetos en movimiento siempre regresaban a un estado de descanso a causa de la fricción. Si ponemos en movimiento un carro, encuentra fricción en el aire con el que se enfrenta, en el suelo sobre el cual se mueven sus ruedas, en los ejes en torno a los cuales giran éstas y, salvo que ruede cuesta abajo, más pronto o más tarde acabará por pararse. Podemos dar al carro una línea aerodinámica, engrasar los ejes y utilizar una carreta suave y lisa, pero todo esto no hará más que reducir los efectos de la fricción. Finalmente el carro dejará de moverse, aparentemente por sí mismo.

Newton nunca tuvo la ocasión de ver una película de las astronautas en el espacio, pero supo predecir lo que sucedería. Cuando un astronauta suelta un lápiz delante de él no sucede nada. Se limita a quedarse allí. Si lo empuja, el lápiz continúa adelante en la dirección del empujón hasta que tropieza con la pared. Si no estuviera allí ese obstáculo el lápiz continuaría moviéndose uniformemente, en principio para siempre (el astronauta que le dio el empujón se movería también en dirección opuesta, pero mucho más despacio debido a su mayor masa).

Tercero, el punto de partida de Newton era: «Yo no hago hipótesis» (*Hypotheses non fingo*), lo que venía a significar que basaba sus leyes en las pruebas que le aportaba la experiencia y nada más. Su criterio sobre la validez de todo lo que había escrito era que cualquiera podría ser capaz de

reproducir sus experimentos y obtendría los mismos resultados. Si algo podía ser verificado experimentalmente, eso era cierto, verdadero. Si no era así, resultaba sospechoso.

La Iglesia tomó un punto de vista oscuro (eso es lo menos que puede decirse de su posición). Hacía casi quince siglos que venía afirmando cosas que difícilmente podían ser probadas experimentalmente; la física de Newton era, cuando menos, un desafío directo al poder de la Iglesia. Y éste era considerable.* Poco antes del nacimiento de Newton, Galileo fue acusado por la Inquisición por afirmar que la Tierra se movía alrededor del Sol y por esbozar con ello implicaciones teológicas inaceptables para la Fe. Galileo se vio obligado a enfrentarse con penas de encarcelamiento y quizá peores aún. Esto causó una considerable impresión en muchos, entre ellos en otro fundador de la ciencia moderna: el francés René Descartes.

En la década de 1630-1640, Descartes visitó los jardines reales de Versalles, que eran famosos por sus complicados autómatas. Cuando se hacía correr el agua, sonaba la música, las ninfas comenzaban a actuar y un gigantesco Neptuno, con tridente y todo, avanzaba con aire amenazador. Estuviese o no la idea en su mente antes de hacer esa visita, el caso es que la filosofía de Descartes, que éste basaba en sus matemáticas, era la de que el universo y todas las cosas en él, eran autómatas. Desde la época de Descartes hasta el comienzo del siglo actual, y posiblemente a causa de este pensador, nuestros antepasados comenzaron a contemplar al universo como una Gran Máquina. En el transcurso de los trescientos años siguientes se desarrollaron ciencias dirigidas específicamente a descubrir como trabajaba esa Gran Máquina.

La segunda gran aportación de Newton a la ciencia fue su ley de la gravedad. La gravedad es un fenómeno notable, pese a que lo consideremos como algo que se nos da por añadidura, normal y omnipresente. Por ejemplo, si mantenemos una pelota alzada sobre el suelo y la soltamos, la pelota cae directamente al suelo. Pero, ¿cómo ocurre esto? El suelo no se alza para coger la pelota y sin embargo la pelota se siente empujada, asida, y cae a tierra. Los antiguos físicos llamaron a este fenómeno inexplicable «acción-a-distancia». Como todos los demás hombres de su época, Newton se sintió intrigado por ese misterio. En su *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* escribió:

> «No he sido capaz de descubrir las causas de estas propiedades de la gravedad basándome en sus fenómenos y no he sacado ninguna hipótesis... me basta con decir que la gravedad existe realmente y actúa acorde con las leyes que ya hemos explicado. Y además sirve para explicar todos los movimientos de los cuerpos celestes.»[4]

* En los tiempos de los descubrimientos de Newton el poder de la Iglesia ya había sido desafiado por Martín Lutero. Newton era de por sí una persona piadosa y creyente. Los argumentos específicos de la Iglesia no iban contra su método empírico, sino contra las conclusiones teológicas que, basadas en las ideas de Newton, venían siendo desarrolladas. Conclusiones que involucraban el concepto de Dios y la posición central del hombre en la Creación.

Newton sintió con claridad que la comprensión auténtica de la naturaleza de la gravedad estaba por encima de toda comprensión. En una carta dirigida a Richard Bentley, un universitario clasicista, escribió:

> «... que un cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia, a través del vacío y sin ninguna otra mediación, y que su acción y fuerza puedan pasar de uno al otro, es para mí un absurdo tan grande que creo que nunca estará de acuerdo con ello ningún hombre que sea intelectualmente competente en materia filosófica.»[5]

En resumen: «la acción-a-distancia» podía ser descrita, pero no explicada.

La tesis de Newton era que la misma fuerza que hacía caer las manzanas, mantenía a la Luna en órbita en torno a la Tierra y a los planetas girando en torno al Sol. Para someter a prueba su idea, calculó diversos movimientos de la Luna y los planetas, utilizando sus propias matemáticas. Después comparó sus hallazgos con las observaciones de los astrónomos. ¡Sus cálculos y las observaciones de los astrónomos coincidían! De un solo golpe Newton apartó la hipótesis de que existía una diferencia esencial entre los objetos terrestres y los celestes y demostró que unos y otros estaban sometidos a las mismas leyes. De ese modo estableció una mecánica celeste racional. Lo que hasta entonces habían sido los poderes de los dioses, o de Dios, pasó a entrar de lleno en el campo de los conocimientos comprensibles a los mortales.

La ley de la gravitación de Newton no explicaba la gravedad (eso lo haría Einstein en su teoría general de la relatividad), pero sometió los efectos de la gravedad a un riguroso formalismo matemático.

Newton fue la primera persona en descubrir principios en la naturaleza que unificaban amplias áreas de experiencia. Logró abstraer ciertos conceptos unificadores en la infinita diversidad de la naturaleza y les dio a esos conceptos una expresión matemática. Por eso, más que por cualquier otra cosa, la obra de Newton nos ha influido de manera tan inevitable. Newton nos mostró que los fenómenos del universo están estructurados de forma racional y comprensible. Puso a nuestra disposición el instrumento más poderoso de todos los tiempos. En Occidente hemos utilizado esa herramienta, si no sabiamente sí al menos con nuestra mejor habilidad. Los resultados, tanto los negativos como los positivos, han sido espectaculares. La historia del enorme impacto del hombre en nuestro medio ambiente comienza con la obra de Newton.

Fue Galileo Galilei quien, saliendo de la Edad Media, cuantificó por vez primera el mundo físico. Midió el movimiento, la frecuencia, la velocidad y la duración de todo, desde las piedras que caían al suelo a los movimientos del péndulo (como el candelabro de su catedral). Fue Descartes quien desarrolló muchas de las técnicas fundamentales de las matemáticas modernas y nos ofreció la imagen del universo como una Gran Máquina. Pero sería Isaac Newton quien formulara las leyes que hacían que esa

Gran Máquina se moviera.

Esos hombres chocaron profundamente contra el muro de la escolástica, el sistema de pensamiento medieval vigente desde el siglo XII al XV. Fueron ellos los que intentaron colocar al hombre en el centro del escenario o, al menos, hacerlo volver a la escena, probar que no necesitaba ser un simple espectador en un mundo gobernado por fuerzas insondables. Quizá la mayor ironía de la historia es que consiguieron exactamente todo lo contrario.

Joseph Weizenbaum, un científico del Instituto de Tecnología de Massachussetts, escribió refiriéndose a las computadoras:

> «La ciencia le promete el poder al hombre... Pero, como suele ocurrir con tanta frecuencia cuando la gente se deja seducir por promesas de poder, el precio es servidumbre e impotencia. El poder, como no sea el poder de elegir, no es nada.»[6]

¿Cómo ocurre eso?

Las leyes newtonianas describen lo que le sucede a un objeto en movimiento. Una vez que conocemos las leyes del movimiento, podemos predecir el futuro de un objeto que se mueve, partiendo de la base de que conozcamos, inicialmente, algunas cosas sobre él. Mientras mayor sea la información inicial que tengamos, más acertadas serán nuestras predicciones. También podemos «retrodecir» (predecir hacia atrás en el tiempo) la historia pasada de un determinado objeto. Por ejemplo, si conocemos la presente posición y la presente velocidad de la tierra y la luna, podremos predecir dónde estará la tierra en relación con la luna en cualquier momento particular, en el tiempo, en el futuro, lo cual nos ofrece un conocimiento previo de los eclipses, estaciones, y así sucesivamente. De igual manera podremos calcular dónde estuvo la tierra en relación con la luna y cuando ocurrieron acontecimientos similares (eclipses, etc.) en el pasado.

Sin la física newtoniana, el programa espacial no hubiera sido posible. Las sondas lunares son lanzadas en el preciso momento en que el lugar de lanzamiento, en la tierra (que simultáneamente está girando en torno a su eje y avanzando en el espacio), está en una posición relativa con la zona de aterrizaje en la luna (que también gira alrededor de su eje y se mueve en el espacio) de manera que el rumbo seguido por el cohete espacial sea el más corto posible. Los cálculos sobre los movimientos de la tierra, la luna y la nave espacial son realizados por computadoras, pero la mecánica utilizada es la misma que fue descrita por Newton en *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica.*

En la práctica resulta muy difícil conocer todas las circunstancias iniciales relativas a un suceso. Incluso la acción, aparentemente tan sencilla, de lanzar una pelota contra una pared es sorprendentemente compleja. La forma, tamaño, elasticidad y momento de la pelota, el ángulo con que se lanza, la densidad, presión, humedad y temperatura del aire, la forma, la dureza y la posición de la pared... ¡para nombrar sólo algunos de los ele-

mentos esenciales que se requieren para conocer dónde y cuándo la pelota dará en el suelo! Resulta más difícil obtener todos los datos necesarios para una predicción acertada cuando se trata de acciones más complicadas o complejas. Sin embargo, de acuerdo con la vieja física es posible, en principio, predecir *exactamente* cómo va a desarrollarse un acontecimiento si tenemos la suficiente información sobre él. En la práctica es sólo la enormidad de la tarea lo que nos impide hacerlo.

La habilidad para predecir el futuro basándose en un conocimiento del presente y de las leyes del movimiento les dio a nuestros antepasados un poder que nunca antes habían conocido. Sin embargo, esos conceptos llevaban consigo una lógica deprimente. Si las leyes de la naturaleza determinan el futuro de un suceso, entonces, con la suficiente información, podríamos haber predicho nuestro presente en alguna época anterior. En resumen, si nos decidimos a aceptar la determinación mecanicista de la física de Newton — si el universo es una gran máquina — desde el mismo momento en que fue creado y puesto en movimiento el universo, todo lo que habría de suceder estaría ya determinado.

De acuerdo con esa filosofía, nosotros *aparentemente* tendríamos nuestra voluntad propia y la habilidad de alterar el curso de los acontecimientos en nuestras vidas, pero esto no sería así en realidad. Todo estaría predestinado desde el principio de los tiempos, incluso la ilusión de tener una libre voluntad. El universo sería una cinta magnetofónica grabada que se reproduce de la única manera posible. La condición humana resultaba así mucho más lóbrega y sombría que lo fuera antes de la aparición de la ciencia. La Gran Máquina funcionaba a ciegas y todo lo que había en ella no eran más que ruedas dentadas, partes de un mecanismo.

De acuerdo con la mecánica cuántica, sin embargo, no es posible *ni siquiera en principio* llegar a conocer lo suficiente del presente para poder hacer una predicción completa del futuro. Incluso si dispusiéramos del tiempo y el determinismo para querer llevarlo a cabo esto no sería posible, aun disponiendo de los mejores instrumentos de medición. No es cuestión del tamaño de la tarea ni de la ineficacia de los detectores. La verdadera naturaleza de las cosas es tal que tenemos que elegir cuál de sus aspectos es el que deseamos conocer mejor, puesto que sólo podremos conocer con precisión uno de ellos.

Fue así como se expresó Niels Bohr, otro de los fundadores de la mecánica cuántica:

> «... En la mecánica cuántica, no nos encontramos ante la arbitraria renuncia a un análisis más detallado de los fenómenos atómicos, sino ante el reconocimiento de que tal análisis está *en principio* excluido.»[7] (La cursiva en el original.)

Imaginemos, por ejemplo, un objeto que se mueve en el espacio. Tiene una posición y un momento que podemos medir. Éste es un ejemplo de la física antigua (newtoniana). (El momento es una combinación del ta-

maño de un objeto, la velocidad a que se mueve y la dirección de ese movimiento.) Puesto que estamos en condiciones de determinar ambas cosas, la posición y el momento del objeto en un tiempo particular, no es asunto demasiado complicado calcular dónde estará en algún instante del futuro. Si vemos un avión que vuela en dirección norte a cuatrocientos kilómetros a la hora, sabemos que al cabo de media hora estará a doscientos kilómetros de distancia más al norte, si no cambia su rumbo ni su velocidad.

El descubrimiento mentalmente más subyugador de la mecánica cuántica es que las teorías newtonianas no tienen aplicación a los fenómenos subatómicos. En el campo de lo subatómico no podemos conocer con absoluta precisión al mismo tiempo el momento y la posición de una partícula. Podemos conocer ambas cosas aproximadamente, pero mientras más sepamos de la una menos sabremos de la otra. Éste es el principio de incertidumbre de Werner Heisenberg. Por increíble que esto parezca ha sido comprobado repetidas veces por la experimentación.

Naturalmente, si nos representamos una partícula en movimiento resulta difícil imaginar que no se está en condiciones de medir su posición y su momento. El no poder hacerlo es algo que desafía a nuestro «sentido común.» Pero éste no es el único fenómeno de la mecánica cuántica que se contradice con el sentido común. En realidad las contradicciones al sentido común forman el corazón de la nueva física. Nos dicen una y otra vez que el mundo tal vez no es lo que nosotros pensamos. Es posible que sea más, mucho más.

Puesto que no podemos determinar, al mismo tiempo, la posición y el momento de las partículas subatómicas, no estamos en condiciones de predecir mucho sobre ellas. Por lo tanto, la mecánica cuántica no predice ni puede predecir sucesos específicamente determinados. Lo que sí hace es predecir *probabilidades*. La probabilidad es el tanto por ciento de posibilidades de que una cosa ocurra o no. La teoría del quanto puede predecir la probabilidad de un acontecimiento microscópico con la misma precisión que la física de Newton predice la real aparición de un acontecimiento macroscópico.

La física newtoniana dice: «Si éstas y éstas son las circunstancias ahora, esto y esto otro va a suceder en un instante próximo.» La mecánica cuántica dice: «Si éstas y éstas son las circunstancias ahora, entonces la probabilidad de que tal y tal cosa vaya a suceder es...»

Nunca podremos conocer con certeza lo que le va a suceder a la partícula que estamos «observando». Todo lo que sabemos con seguridad son las probabilidades que tiene de comportarse de determinado modo. Esto es lo máximo que podemos saber porque los dos factores que tendrían que incluirse en una ecuación newtoniana (posición y momento), no pueden ser conocidos con precisión a la vez. *Tenemos que elegir,* mediante la selección de nuestro experimento, cuál de ellas queremos medir con mayor exactitud.

La lección que nos da la física de Newton es que el universo está gobernado por leyes que son susceptibles de ser comprendidas racionalmen-

te. Aplicando esas leyes podemos extender nuestro conocimiento y, en conferencia, nuestra influencia sobre el medio ambiente. Newton era un hombre religioso. Veía sus leyes como una manifestación de la perfección de Dios. Lo que no era obstáculo para que sirvieran bien la causa del hombre. Respetaban su dignidad y reivindicaban su importancia en el universo. Tras el Medievo, un nuevo afán de ciencia (*Natural Philosophy*) llegó como una brisa fresca y agradable para revitalizar al espíritu. Resulta irónico que, al final, la *Natural Philosophy* redujera la condición del hombre a la de una rueda dentada más, incapaz de decidir nada por sí mismo, en el interior de una máquina cuyo funcionamiento había sido ya preordenado desde el primer día de la Creación.

Contrariamente a la física de Newton, la mecánica cuántica nos dice que nuestro conocimiento de lo que gobierna los acontecimientos a nivel subatómico no es ni aproximadamente lo que presumimos sería. Nos dice que no podemos predecir fenómenos subatómicos con ninguna certeza. Lo único que podemos hacer es predecir sus probabilidades.

Desde un punto de vista filosófico, las implicaciones de la mecánica cuántica resultan sicodélicas. No sólo influimos en nuestra realidad sino que, en cierto grado, la *creamos*. Puesto que forma parte de la naturaleza de las cosas el que no podamos conocer al mismo tiempo el momento de una partícula y su posición, sino sólo una de las dos cosas, *tenemos que elegir* cuál de esas propiedades queremos determinar. Metafísicamente eso está muy cerca de la afirmación de que creamos ciertas propiedades porque elegimos medir esas propiedades. Dicho de otra forma, es posible que creemos algo que tiene posición, por ejemplo una partícula, porque intentamos determinar una posición. Y es imposible determinar una posición sin que haya alguna *cosa* que ocupe la posición que queremos determinar.

Los físicos cuánticos presentan preguntas como éstas: «¿Existía una partícula con momento antes de que realizáramos el experimento para medir su momento?»; «¿Existía una partícula con posición antes de que realizáramos un experimento para medir su posición?», y «¿Existían las partículas antes de que nosotros pensáramos en ellas y las midiéramos?» «*¿Creamos nosotros las partículas con las que experimentamos?*» Aunque esto suene increíble es una posibilidad admitida por muchos físicos.

John Wheeler, un famoso físico de Princeton, escribió:

> «Al universo ¿lo trae, de alguna manera, a la existencia la participación de los participantes?... El acto vital es el acto de participación. Participador es el nuevo concepto incontrovertible ofrecido por la mecánica cuántica. Derroca el término observador, de la teoría clásica, que designa al hombre que está seguro detrás de un grueso cristal protector y observa lo que ocurre a su alrededor sin participar en ello. Esto es algo que no puede hacerse en la mecánica cuántica.»[8]

Los idiomas de los místicos orientales y el de los físicos occidentales se están haciendo muy parecidos.

Los físicos newtonianos y los físicos que utilizan la mecánica cuántica son socios en un doble sentido irónico. La física newtoniana está basada en la idea de que hay leyes que gobiernan determinados fenómenos y tienen el poder inherente que da su comprensión; pero conduce a la impotencia frente a la Gran Máquina que es el Universo. La mecánica cuántica se basa en la idea del conocimiento mínimo de los fenómenos futuros (estamos limitados al conocimiento de las probabilidades), pero conduce a la posibilidad de que nuestra realidad sea la que nosotros decidamos crearnos.

Hay otra diferencia fundamental entre la antigua y la nueva física. La física antigua presume la existencia de un mundo externo, aparte de nosotros. Supone, además, que podemos observar, medir y especular con ese mundo exterior sin cambiarlo. De acuerdo con la física antigua ese mundo externo siente la mayor indiferencia hacia nosotros y nuestras necesidades.

La dimensión histórica de Galileo procede de sus incansables esfuerzos (con éxito) para cuantificar (medir) los fenómenos del mundo exterior. Hay un gran poder inherente en el proceso de cuantificación. Por ejemplo, una vez que se ha descubierto una relación, como por ejemplo el ritmo de aceleración de un objeto que cae, ya no importa quién arroja el objeto, qué objeto es el arrojado o el por qué se arroja. Los resultados siempre son los mismos. Un experimentador italiano obtiene los mismos resultados que un experimentador ruso que repita el experimento cien años después. Los resultados son idénticos, sean realizados por un escéptico, un creyente o un espectador indiferente.

Hechos como ése convencieron a los filósofos de que el universo físico continúa siempre su camino, haciendo lo que tiene que hacer, sin tomar en cuenta en absoluto a sus habitantes. Por ejemplo, si simultáneamente arrojamos a dos personas desde la misma altura es un hecho verificable (repetible) que ambos chocarán contra el suelo al mismo tiempo, no importa cuál sea su peso. Podemos medir la caída, la aceleración y el impacto de manera exactamente igual que lo haríamos si se tratara de dos piedras. Y, en realidad, los resultados serán los mismos que si de piedras se tratara.

—Pero existe una una diferencia entre hombres y piedras — podría objetarse —. Las piedras no tienen opiniones ni emociones. Las gentes sí. Una de esas dos personas arrojadas, por ejemplo, pudo estar asustada por la experiencia y la otra, quizás, sólo furiosa. ¿Es que sus sentimientos no tienen ningún lugar en ese esquema?

No. Los sentimientos de nuestros sujetos no importan en absoluto. Si los volviéramos a hacer subir a la torre de nuevo (ahora seguramente tratarían de defenderse o lucharían por no subir) y los volviésemos a arrojar otra vez, caerían con la misma aceleración que antes y su caída duraría exactamente el mismo tiempo, pese a que ahora ambos estarían luchando como locos por escapar. La Gran Máquina es impersonal. En realidad fue precisamente esta impersonalidad la que inspiró a los científicos para bus-

car la «objetividad absoluta».

El concepto de objetividad científica descansa en la presunción de un mundo externo que está «allá fuera», en oposición al «Yo» que está «aquí dentro». Esa forma de percepción que pone a los demás «allá fuera», hace que se sienta muy solitario quien se situó «aquí dentro». Según este punto de vista, la Naturaleza, con toda su diversidad, está «allá fuera». La tarea del científico consiste en observar ese «allá fuera» del modo más objetivo posible. Observar algo de manera objetiva significa verlo como aparecería ante un observador que no tuviera prejuicio alguno hacia lo que está observando.

El problema que pasó desapercibido durante tres siglos es que la persona que da muestras de una actitud como ésa, ciertamente, tiene prejuicios. Su prejuicio es su sentimiento de que está obligado a ser objetivo, es decir, a no tener una opinión preformada. En realidad resulta imposible carecer de opinión. Opinar que se carece de opinión es también una opinión. La decisión de estudiar un segmento de la realidad en vez de otro, es una decisión subjetiva del investigador que la toma. Afecta a su percepción de realidad, aunque sólo sea a eso. Y dado que lo que aquí estamos estudiando es precisamente la realidad, el problema se complica.

La nueva física, la mecánica cuántica, nos dice que no es posible observar la realidad sin cambiarla. Si observamos un experimento relacionado con la colisión de una determinada partícula, no sólo no podemos probar que el experimento nos daría el mismo resultado si no lo estuviéramos observando, sino que, a la inversa, todo lo que sabemos parece indicar lo contrario: el resultado no sería el mismo puesto que el resultado obtenido está afectado por el hecho de que lo estamos observando.

Algunos experimentos prueban que la luz es un fenómeno semejante al ondulatorio; otros experimentos prueban, igualmente, que la luz es un fenómeno de emisión de partículas. Si queremos demostrar que la luz es un fenómeno ondulatorio o por el contrario de emisión de partículas, lo único que tenemos que hacer es elegir el experimento adecuado al resultado que pretendemos obtener.

De acuerdo con la mecánica cuántica, la objetividad no existe. No nos podemos eliminar del conjunto del cuadro general. Somos parte de la naturaleza y cuando estudiamos la naturaleza, no puede eludirse el hecho de que es la naturaleza la que se está estudiando a sí misma. La física se convierte, así, en una rama de la sicología. O quizá a la inversa: la sicología se convierte en una parte de la física.

Como ha dicho Carl Jung, el sicólogo suizo:

> «La normativa sicológica dice que cuando una situación interna no se hace consciente ocurre en el interior de nosotros como un hecho real. Eso viene a significar que cuando lo individual permanece intacto, individido, y no adquiere consciencia de su contradicción interna, el mundo tiene que eliminar forzosamente al conflicto que se desgarra en dos mitades opuestas.»[9]

El físico Wolfgang Pauli, ganador del Premio Nobel y amigo de Carl Jung, lo expresó de este modo:

> «Desde un centro interno, la psique parece moverse hacia fuera, en el sentido de una extroversión, hacia el mundo físico...»[10]

Si ambos están en lo cierto, entonces la física es el estudio de la estructura de la consciencia.

* * *

El descenso desde el nivel de lo macroscópico al nivel microscópico, lo que hemos venido llamando el campo de lo muy pequeño, es un proceso que hay que realizar en dos tiempos. El primer paso hacia abajo nos lleva al nivel atómico. El segundo nos hace descender al nivel subatámico.

El objeto más pequeño que podemos ver, incluso bajo la lente de un microscopio, contiene millones de átomos. Para ver los átomos en una pelota de tenis tendríamos que dar a la pelota el tamaño de la tierra entera. Si la pelota tuviera el tamaño de nuestro globo, sus átomos serían, aproximadamente como uvas.

El segundo paso hacia abajo nos lleva al nivel subatómico, donde nos encontramos con las partículas que componen los átomos. La diferencia entre el nivel atómico y el nivel subatómico es mayor que la diferencia entre el nivel atómico y el nivel de las pelotas de tenis y las raquetas. Sería imposible ver el núcleo de un átomo del tamaño de una uva. Sería imposible, en realidad, ver el núcleo de un átomo del tamaño de una habitación. Para poder ver el núcleo de un átomo, éste tendría que ser del tamaño de un edificio de catorce pisos. El núcleo de un átomo que tuviera la altura de una casa de catorce pisos, tendría el tamaño de un grano de sal. Puesto que una partícula nuclear tiene dos mil veces la masa de un electrón, el electrón que girara en torno a su núcleo sería como una partícula de polvo.

La cúpula de la Basílica de San Pedro, en el Vaticano, tiene el diámetro de un edificio de catorce pisos. Imagínese el lector un grano de sal en medio de la cúpula de San Pedro con unas cuantas partículas de polvo girando a su alrededor en los límites de la cúpula. Esto nos da un ejemplo a escala de las partículas subatómicas. Es en este terreno, el terreno de lo subatómico, donde la física de Newton se muestra inadecuada y la mecánica cuántica es necesaria para explicar la conducta de las partículas.

Una partícula subatómica no es una «partícula» semejante a una partícula de polvo. Es algo más que una diferencia de tamaño lo que establece la diferencia entre una partícula de polvo y una partícula subatómica. Una partícula de polvo es una *cosa,* un objeto. Una partícula subatómica no puede ser representada como una cosa. Por consiguiente, hemos de abandonar la idea de considerar a las partículas subatómicas como objetos.

La mecánica cuántica ve a las partículas subatómicas como «una ten-

dencia a existir» o «una tendencia a ocurrir». La fuerza de esas tendencias es expresada en término de probabilidades. Una partícula subatómica es un «quanto» (quántum), lo que quiere decir una cantidad de algo. Lo que sea ese algo es materia de especulación. Muchos físicos piensan que resulta carente de significado incluso el simple planteamiento de esa cuestión. Podría ser que la búsqueda de la última materia constitutiva del universo fuese una cruzada en busca de la ilusión. A nivel subatómico la masa y la energía cambian incesantemente entre sí. Los físicos especializados en el estudio de las partículas están ya tan familiarizados con los fenómenos de la masa que se transforma en energía y de la energía que se transforma en masa, que rutinariamente miden la masa de las partículas en unidades de energía.* Dado que la tendencia de los fenómenos subatómicos a ponerse de manifiesto bajo ciertas condiciones son probabilidades, esto nos lleva al terreno de la estadística.

Puesto que existen millones de millones de partículas subatómicas en el espacio más pequeño que podamos ver, resulta conveniente ocuparse de ellas en el terreno de la estadística. Las descripciones estadísticas son imágenes representativas de la conducta colectiva de las masas. La estadística no puede decirnos cómo se comportará un individuo dentro de una multitud, pero nos puede hacer una descripción bastante exacta, basada en observaciones repetidas, de cómo se comportará un grupo en su conjunto.

Por ejemplo, el estudio estadístico del crecimiento de una población puede decirnos cuántos niños han nacido cada año y cuántos se calcula que van a nacer en los próximos años. Pero la estadística no puede decirlos cuáles son las familias que van a tener los nuevos niños y cuáles no. Si queremos conocer cómo se desarrolla el tráfico en un cruce, podemos instalar aparatos que nos suministrarán datos. Los datos estadísticos que nos suministrarán los aparatos pueden decirnos, por ejemplo, cuántos coches giran a la izquierda y cuántos a la derecha, durante determinadas horas, pero no puede decirnos *qué* coches van a ser los que hagan uno u otro movimiento.

La estadística es utilizada también en la física de Newton. Por ejemplo se usa para conocer la relación existente entre el volumen de un gas y la presión. Esta relación es llamada Ley de Boyle en honor de su descubridor, Robert Boyle, que fue contemporáneo de Newton. Con mayor sencillez podría llamársela Ley de la Bomba de Bicicleta, como podremos ver. La Ley de Boyle dice que si, a una temperatura constante, el volumen de un recipiente que encierra una determinada cantidad de gas se reduce a la mitad, la presión del gas contenido aumentará al doble.

Imaginémonos a una persona con una bomba de bicicleta. Ha levantado el émbolo hasta su límite máximo y está a punto de hacerlo descender. El tubo de la bomba está conectado con un medidor de presión (en vez de con la cámara de la bicicleta) de manera que podemos ver cuál es

* En términos concretos, de acuerdo con la teoría de la relatividad especial de Einstein, la masa *es* energía y la energía *es* masa. Donde está una, está la otra.

la presión en el interior de la bomba. Puesto que no se ejerce ninguna presión sobre el tubo de salida, no hay presión en el cilindro de la bomba y, por lo tanto, el medidor de presión indicará cero. Realmente la presión en el interior de la bomba no es cero. Vivimos en el fondo de un océano de aire (nuestra atmósfera). El peso de muchos kilómetros de aire sobre nosotros ejerce una presión de un kilogramo por centímetro cuadrado. Si nuestro cuerpo no se derrumba aplastado es porque él, a su vez, ejerce una presión idéntica de un kilogramo por centímetro cuadrado hacia fuera. Ésta es la situación en que se leería cero en el manómetro. Para ser más exactos, supongamos que hacemos que el manómetro marque un kilogramo por centímetro cuadrado antes de que apretemos el émbolo.

Hagamos que el pistón del émbolo descienda la mitad del recorrido. El volumen interior del cilindro de la bomba es ahora la mitad del original y no se ha permitido la salida de la menor cantidad de aire. El manómetro marcará dos kilogramos por centímetro cuadrado, es decir, el doble de la presión original. Sigamos empujando el émbolo hasta los dos tercios de su camino. El volumen del interior de la bomba es ahora un tercio del original y el manómetro marcará el triple de la presión original (tres kilogramos por centímetro cuadrado). Ésta es la Ley de Boyle: a temperatura constante la presión de una cantidad de gas es inversamente proporcional a su volumen. Si el volumen se reduce a la mitad, la presión aumenta al doble; si el volumen se reduce a un tercio la presión se triplica, etc. Para explicar el porqué es así, hemos de recurrir a la estadística clásica.

El aire (un gas) en la bomba de nuestro ejemplo, está compuesto de moléculas (las moléculas están compuestas de átomos). Estas moléculas están en movimiento constante y en un momento determinado millones de ellas golpean el interior de las paredes de la bomba. Aunque no podemos detectar cada una de las microscópicas colisiones, el macroscópico efecto de los millones de impactos sobre un centímetro cuadrado produce el fenómeno de la presión. Si reducimos el volumen de la bomba a la mitad apretamos a las moléculas en un espacio dos veces menor que el original con lo cual hacemos que se produzca un número de impactos doble en el mismo centímetro cuadrado de la pared de la bomba. Por consiguiente, el efecto macroscópico, de conjunto, hace que la presión se duplique. Si contraemos las moléculas en la tercera parte del espacio original, hacemos que golpeen tres veces más en el mismo centímetro cuadrado de la pared de la bomba y la presión se triplica. Ésta es la teoría cinética de los gases.

En otras palabras: la presión es el resultante de la conducta de grupo de un gran número de moléculas en movimiento. Cada uno de los sucesos individuales puede ser analizado, porque, de acuerdo con la física de Newton, cada suceso individual está, teóricamente, sujeto a las leyes deterministas. En principio podemos calcular el camino seguido por cada partícula en la cámara de la bomba. De ese modo es como se utilizaba la estadística en la antigua física.

La mecánica cuántica también utiliza la estadística, pero hay una gran diferencia entre la mecánica cuántica y la física de Newton. En la mecá-

nica cuántica no hay modo de predecir conductas individuales. Ésta es la lección de partida que nos enseñan los experimentos realizados en el terreno de lo subatómico.

La mecánica cuántica se ocupa del comportamiento del grupo. Intencionadamente deja con cierta vaguedad la relación entre el comportamiento de los grupos y los sucesos individuales, porque a nivel subatómico los comportamientos individuales no pueden ser determinados con certeza (el principio de incertidumbre) y, como veremos al estudiar a las partículas de alta energía, están en cambio continuo. La mecánica cuántica abandona las leyes que gobiernan a los comportamientos individuales y proclama *directamente* las leyes estadísticas que rigen las sumas de comportamiento. La mecánica cuántica nos dice cómo va a comportarse un grupo de partículas, pero lo único que puede decirnos sobre el comportamiento individual de una partícula es cómo probablemente va a comportarse. La probabilidad es la característica más importante de la mecánica cuántica.

Esto hace que sea un instrumento ideal para ocuparse de los fenómenos subatómicos. Tomemos, por ejemplo, el fenómeno de la reducción grarual de la radiactividad natural (por ejemplo en las esferas luminosas de los relojes). La disminución paulatina de la emisión radiactiva es un fenómeno predecible de comportamiento de grupo como consecuencia de comportamientos individuales impredecibles.

Supongamos que colocamos un gramo de radio en una caja fuerte con apertura de tiempo y lo dejamos allí durante mil seiscientos años. Cuando haya transcurrido ese tiempo y la caja de caudales vuelva a abrirse, ¿encontraremos en su interior un gramo de radio? ¡No! Sólo hallaremos medio gramo, exactamente la mitad de la cantidad que pusimos en ella. Esto se debe a que los átomos de radio se van desintegrando de modo natural a un ritmo que hace que a cada mil seiscientos años se pierda la mitad de él. Como consecuencia los físicos dicen que un átomo tiene una «vida media» de mil seiscientos años. Si dejamos el medio gramo de radio en la caja, al volver a abrirla al cabo de otros mil seiscientos años, sólo quedará un cuarto de gramo. Cada mil seiscientos años la mitad de los átomos de radio existentes en el mundo desaparecen. ¿Cómo podemos saber cuáles son los átomos que van a desintegrarse y cuáles no?

No podemos. Podemos predecir la cantidad de átomos que van a desintegrarse en la próxima hora, pero no tenemos modo de saber *cuáles* son los que van a hacerlo. No existe una ley física que nos pueda hacer saber cuál es esta selección. O al menos no la conocemos. Que se desintegren unos átomos u otros es puramente una cuestión de azar. Sin embargo, el radio continúa reduciéndose según lo previsto, con una vida media conocida, concreta e invariable de mil seiscientos años. La teoría del quanto no se ocupa de las leyes que gobiernan la desintegración de los átomos de radio, considerados individualmente, y pasa, directamente, a actuar de acuerdo con las leyes estadísticas que gobiernan la desintegración de los átomos de radio en grupo. De ese modo es cómo se utilizan las estadísticas en la nueva física.

Otro buen ejemplo de comportamiento global predecible (estadísticamente) consistente en sucesos individuales impredecibles son las constantes variaciones de intensidad entre las líneas espectrales. Recuerde el lector que, según la teoría de Bohr, los electrones de un átomo se localizan sólo en capas situadas a una distancia específica del núcleo (pág. 34). Normalmente el electrón único del átomo de hidrógeno permanece en la capa más próxima al núcleo (estado fundamental). Si lo excitamos (le añadimos energía) haremos que salte a una capa más externa. Mientras mayor cantidad le añadamos más amplio será su salto. Si cesamos de excitarlo, el electrón salta de regreso a la capa más interna, más próxima al núcleo. Con cada uno de sus saltos desde una capa exterior a otra interior, el electrón emite una cantidad de energía igual a la cantidad de energía que absorbió cuando le hicimos saltar hacia las capas exteriores. Esos paquetes de energía emitidos (fotones) constituyen la luz que, al ser dispersada por un prisma, forma el espectro de unas cien líneas coloreadas que componen el espectro del hidrógeno. Cada línea coloreada en el espectro del hidrógeno está formada por la luz emitida por los electrones del hidrógeno cuando saltan de una determinada capa externa a otra determinada capa interna.

Lo que no mencionamos antes es que algunas de esas líneas del espectro del hidrógeno son más pronunciadas que otras. Las líneas más pronunciadas siguen estando más pronunciadas siempre y las más débiles son siempre más débiles. La intensidad de las líneas del espectro del hidrógeno varía porque los electrones del hidrógeno que regresan a su estado fundamental no siempre toman el mismo camino.

Es posible que, por ejemplo, la capa cinco puede ser un punto de parada más corriente que la capa número 3. En ese caso, el espectro producido por millones de átomos de hidrógeno excitados marcarán una línea espectral más pronunciada correspondiente a los electrones que saltan de la capa cinco a la capa uno, y menos pronunciada la línea correspondiente a los saltos de los electrones desde la capa tres a la capa uno. Eso ocurre, en este ejemplo, porque el número de electrones que se detienen en la capa cinco antes de saltar a la capa uno, es mayor que el de los que se detienen en la capa tres antes de saltar a la capa uno.

En otras palabras la probabilidad es muy alta, en este ejemplo, de que los electrones del hidrógeno, excitados, se detengan en la capa cinco en su regreso a la capa uno, y menos la de que se detengan en la capa tres. Dicho de otro modo, sabemos que un cierto número de electrones probablemente se detendrán en la capa cinco y que un número menor de electrones se detendrán en la capa tres. Pero no tenemos modo de saber cuáles son los electrones que se van a detener en una u otra capa. Como en el caso anterior podemos precisar un comportamiento colectivo sin estar en condiciones de predecir ni uno solo de los comportamientos individuales qus componen el fenómeno colectivo.

Esto nos conduce a la cuestión filosófica central de la mecánica cuántica, textualmente: «¿Qué es lo que describe la mecánica cuántica?» O dicho de otro modo: la mecánica cuántica nos describe el comportamiento

colectivo y/o nos predice las probabilidades de comportamietno individual, pero ¿de qué?

En otoño de 1927 un grupo de físicos se reunieron en Bruselas para investigar la temática de la nueva física y se hicieron entre ellos esta misma pregunta. Lo que decidieron allí pasó a ser conocido como la «Interterpretación de Copenhague de la Mecánica cuántica».* Más tarde se desarrollaron otras interpretaciones, pero la interpretación de Copenhague señaló la urgencia de la nueva física como medio consistente de una nueva visión del mundo. Ésta es todavía la interpretación prevalente del formalismo matemático de la mecánica cuántica. La sacudida que produjo en la física el descubrimiento de las inadecuaciones de la física de Newton fue enorme. La cuestión que se plantearon los físicos reunidos en Bruselas no fue si la mecánica de Newton podía ser adaptada a los fenómenos subatómicos (estaba claro que resulta imposible), sino más bien cómo podía ser reemplazada.

La Interpretación de Copenhague fue la primera formulación consistente de la mecánica cuántica. Einstein se opuso a ella en 1927 y siguió criticándola hasta su muerte, aunque él también, como todos los físicos, se vio forzado a reconocer sus ventajas en la explicación de los fenómenos subatómicos.

La Interpretación de Copenhague dice, en efecto que ¡*no importa* a qué se refiera la mecánica cuántica!** Lo importante es que funciona. Ésta es una de las declaraciones más importantes en la historia de la ciencia. La Interpretación de Copenhague de la Mecánica cuántica dio comienzo a una reunión monumental que no pasaría desapercibida en su tiempo. La parte racional de nuestra psique, tipificada por la ciencia, comenzó a combinarse de nuevo con otra parte de nuestro ser que veníamos ignorando desde comienzos del siglo XVIII: nuestra componente irracional.

La idea científica de la verdad estuvo anclada tradicionalmente, durante mucho tiempo, en la creencia de una verdad absoluta, que se hallaba en algún lugar «allá fuera» — es decir, de una verdad absoluta con existencia fuera de nosotros. Mientras más cerca podamos llegar de esa verdad absoluta, más ciertas — se decía — serán nuestras teorías. Pero de todos modos nunca estaremos en condiciones de percibir directamente la verdad absoluta — es decir, de abrir el reloj, en el ejemplo ofrecido por Einstein —, si bien seguiremos tratando de elaborar nuevas teorías tales que cada faceta de verdad absoluta se corresponda a un elemento de nuestras teorías.

La Interpretación de Copenhague elimina la idea de una correspondencia de uno a uno entre realidad y teoría. Ésta es otra forma de expresar

* Fue en el V Congreso de Solvay donde Bohr y Einstein llevaron a cabo su ahora famosa discusión. El término «Interpretación de Copenhague» refleja la influencia dominante de Niels Bohr (de Copenhague) y su escuela ideológica.

** La Interpretación de Copenhague dice que la teoría del quanto se refiere a la interrelación de nuestras experiencias. Trata de lo que será observado bajo condiciones específicas.

algo a lo cual ya hemos aludido anteriormente: la mecánica cuántica se aparta de las leyes que gobiernan los componentes individuales y establece directamente las leyes que rigen a las sumas o agrupaciones. Es muy pragmática.

La filosofía del pragmatismo se desarrolla más o menos así: la mente, por su carácter intrínseco, sólo puede tratar con ideas. No le es posible entrar en relación con otra cosa. En consecuencia, no es correcta la presunción de que la mente puede tomar en consideración, directamente, la realidad. Todo lo que la mente puede hacer es considerar *sus ideas* sobre la realidad. (El que la realidad sea así o no, realmente, no es sino una consideración de tipo metafísico). Por lo tanto, el que algo sea cierto o no, dependerá no de lo estrechamente que se corresponda con la verdad absoluta, sino de su concordancia con nuestra experiencia.*

La extraordinaria importancia de la Interpretación de Copenhague radica en el hecho de que por vez primera un grupo de científicos, que intentaba formular una física consistente, fueron forzados por sus propios descubrimientos a reconocer que un completo conocimiento de la realidad era algo que estaba por encima de la capacidad de todo pensamiento racional. Esto era algo que Einstein no podía aceptar.

«Lo más incomprensible sobre el mundo es que es comprensible»,[11] escribió.

Pero la hazaña estaba realizada. La nueva física no se basó en el conocimiento de la «verdad absoluta», sino *en nosotros mismos.*

Henry Pierce Stapp, un físico del Laboratorio Lawrence Berkeley, lo expresó elocuentemente:

> (La Interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica) «fue esencialmente un rechazo de la presunción de que la naturaleza podía ser comprendida en términos de las realidades elementales espacio-tiempo. De acuerdo con las nuevas ideas, la descripción completa de la naturaleza a nivel atómico está dada por funciones de probabilidad que se referían no a realidades microscópicas subyacentes de espacio-tiempo sino, más bien, a los objetos macroscópicos de la experiencia sensorial. La estructura teórica no se extien-

* La filosofía del pragmatismo fue creada por el sicólogo norteamericano William James. Recientemente, los aspectos pragmáticos de la Interpretación de Copenhague han sido subrayados por Henry Pierce Stapp, un físico teórico que trabaja en el Laboratorio Lawrence Berkeley, en Berkeley, California. La Interpretación de Copenhague, aparte de su lado pragmático, proclama que la teoría del quanto es, en cierto sentido, completa, puesto que ninguna otra teoría puede explicar con mayor detalle los fenómenos subatómicos.

Una faceta esencial de la Interpretación de Copenhague es el principio de la complementaridad de Bohr (al que nos referiremos después). Muchos historiadores colocan en términos de igualdad la Interpretación de Copenhague y el principio de la complementaridad; en sentido general la complementaridad está incorporada a la interpretación pragmática de la mecánica cuántica de Stapp, pero el énfasis especial en la complementaridad es característico de la Interpretación de Copenhague.

de hacia abajo ni se afianza en las realidades fundamentales microscópicas de espacio-tiempo. En vez de ello retrocede y se afianza en las realidades concretas que forman la base de la vida social... Esta descripción pragmática debe ser contrastada con descripciones que intenten «mirar entre bastidores» y que nos digan lo que está «aconteciendo realmente».[12]

Otra forma de entender la Interpretación de Copenhague (de modo retrospectivo) es en términos del análisis de la división cerebral. El cerebro humano está dividido en dos mitades, conectadas en el centro de la cavidad cerebral, por medio de un tejido. Para tratar ciertas enfermedades, por ejemplo la epilepsia, en ocasiones las dos mitades del cerebro son separadas quirúrgicamente. De las experiencias conseguidas y las observaciones hechas con personas que han sido sometidas a esa operación quirúrgica, hemos descubierto un hecho notable: hablando en términos generales la parte izquierda de nuestro cerebro funciona de manera distinta a la derecha. Cada una de las dos mitades ve al mundo de un modo distinto.

La parte izquierda de nuestro cerebro percibe al mundo de forma lineal. Tiende a organizar la información que reciben los sentidos en la forma como los puntos componen una línea, es decir que unos puntos preceden a otros. Por ejemplo el lenguaje, que es lineal (las palabras que se están leyendo se deslizan a lo largo de una línea que va de izquierda a derecha), es una de las funciones del hemisferio cerebral izquierdo. Este hemisferio funciona de manera lógica y racional; la parte izquierda del cerebro es la que crea el concepto de causalidad, la imagen de que una cosa causa otra porque siempre la precede. El hemisferio derecho del cerebro, por el contrario, recibe modelos completos, patrones establecidos.

Las personas que han sido sometidas a la separación quirúrgica de las dos mitades cerebrales tienen, realmente, dos cerebros. Cuando cada uno de esos dos cerebros es examinado separadamente, se descubre que el cerebro izquierdo recuerda cómo se habla y se utilizan las palabras mientras que, por lo general, el derecho no puede hacerlo. ¡Sin embargo el cerebro derecho recuerda la letra completa de una canción! La parte izquierda de nuestro cerebro tiende a dudar de ciertas impresiones de su información sensorial. La parte derecha de nuestro cerebro tiende a aceptar de manera más libre todo lo que se le ofrece. Simplificando: el hemisferio cerebral izquierdo es «racional»; el hemisferio derecho «irracional».

Fisiológicamente, la parte izquierda del cerebro controla la parte derecha del cuerpo y el hemisferio derecho la parte izquierda. Teniendo esto en cuenta, no puede considerarse una coincidencia que la literatura y la mitología asocien la mano derecha (el hemisferio cerebral izquierdo) con las características de racionalidad, masculinidad y energía; y la mano izquierda (el hemisferio derecho) con las características místicas, femeninas y receptivas. Los chinos ya escribieron sobre ese mismo fenómeno hace miles de años (yin y yang), aun cuando no llegaron a ese conocimiento gracias a la cirugía cerebral.

Nuestra sociedad entera representa la postura del hemisferio izquierdo (es racional, masculina y emisora de energía) No ofrece mucho apoyo a las características representativas del hemisferio cerebral derecho (intuición, feminidad y receptividad). La llegada de la «ciencia» marcó el comienzo del ascenso del pensamiento acorde con las tendencias del hemisferio izquierdo, imponiendo la moda de la «cognitio» occidental, y el descenso del pensamiento del hemisferio derecho hacia lo subterráneo (la psique interna) de donde no emergería (con la «re-cognitio» científica) hasta que Freud descubrió el «inconsciente», lo que, como era lógico, lo etiquetó de oscuro, misterioso e irracional (porque es así como el hemisferio izquierdo ve al derecho).

La Interpretación de Copenhague fue, en efecto, un reconocimiento de las limitaciones del pensamiento del hemisferio cerebral izquierdo, aunque los físicos reunidos en Bruselas no debieron pensar en esos términos. Fue también un *re-conocimiento* de aquellos aspectos psíquicos que llevaban mucho tiempo siendo ignorados por una sociedad racionalista. Al fin y al cabo, los físicos son gente que siente curiosidad por el universo. Sentir curiosidad y angustia es entender de modo muy concreto, incluso cuando esa comprensión no pueda ser descrita. La experiencia subjetiva de la curiosidad es un mensaje a la mente racional que expresa que el objeto examinado está siendo percibido y comprendido de modos distintos a lo racional.

La próxima vez que algo nos impresione, que nos cause ansiedad, dejemos que la sensación discurra libremente por nuestro interior sin tratar de comprenderla. Nos daremos cuenta que la *comprendemos* pero de un modo que no estaremos en condiciones de traducir en palabras. Estaremos percibiendo intuitivamente por medio del hemisferio derecho. No se ha atrofiado por falta de uso, pero nuestra capacidad, nuestra habilidad para captar su mensaje ha sido debilitada por tres siglos de negligencia.

Los Maestros de Wu Li perciben en ambos, de manera racional y de manera irracional, la afirmativa y la receptiva, la masculina y la femenina. No descuidan ni una ni otra. No hacen sino bailar.

LECCIONES DE BAILE PARA LA FÍSICA NEWTONIANA	LECCIONES DE BAILE PARA LA MECÁNICA CUÁNTICA
Puede representarse.	No puede representarse.
Está basada en las percepciones ordinarias de los sentidos	Está basada en el comportamiento de las partículas subatómicas y sistemas que no pueden observarse de modo directo.
Describe *cosas*; objetos individuales en el espacio y sus cambios en el tiempo.	Describe conductas estadísticas de *sistemas*.
Predice sucesos.	Predice probabilidades.

Acepta una realidad objetiva «fuera de aquí».	No acepta una realidad objetiva, aparte de nuestra experiencia.
Podemos observar algo sin modificarlo.	No podemos observar algo sin modificarlo.
Proclama estar basada en la «verdad absoluta», en lo que la naturaleza es realmente, «entre bastidores».	Proclama sólo su capacidad de ordenar la experiencia correctamente.

Esto es la mecánica cuántica. La siguiente pregunta es: «¿Cómo funciona?»

MODELOS DE ENERGÍA ORGÁNICA

¿ENTES VIVOS?

Cuando hablamos de la física como modelos o formas de comportamiento de la energía orgánica, la palabra que capta principalmente nuestra atención es «orgánica». Orgánico quiere decir vivo. Mucha gente cree que la física se ocupa de cosas que no están vivas, como un péndulo o una bola de billar. Éste es un punto de vista corriente incluso entre los físicos, pero no resulta tan evidente como a primera vista podría parecer.

Permítasenos explorar este punto de vista con ayuda de una persona hipotética, un muchacho a quien llamaremos Jim de Wit,* campeón perpetuo de la búsqueda de lo no-obvio.

—No es del todo cierto que la física — dice Jim de Wit — se ocupe de cosas no vivas. Esto resulta evidente de nuestra anterior exposición de los cuerpos que caen. Incluso aunque algunos de ellos sean seres humanos, todos experimentarán la misma aceleración si caen en el vacío. Por consiguiente la física se aplica también a los seres vivos.

—Pero ese ejemplo es una trampa — respondemos —. Las rocas no pueden elegir con respecto a la caída. Si las dejamos caer, caen. Si no las dejamos caer, no caen. Los seres humanos, por otra parte, están en condiciones de elegir. Con la excepción de los casos accidentales, no se les encuentra realizando el acto de caer. ¿Por qué? Porque saben que la caída puede lastimarles y no tienen deseos de hacerse daño. En otras palabras, los seres humanos procesan *información* (saben que si caen se pueden hacer daño) y *responden* a ello (no cayendo). Las rocas no pueden hacer ninguna de esas dos cosas.

—Eso es lo aparente — alega de Wit —, pero podría ser que no fuera realmente así. Por ejemplo, sabemos, gracias a la observación de fotografías tomadas a determinados intervalos de tiempo, que las plantas frecuentemente responden a los estímulos con reacciones semejantes a las humanas. Se retraen ante el dolor, avanzan hacia aquellos que les produce placer e, incluso, llegan a marchitarse por falta de afecto. La única diferencia es que lo hacen a un ritmo mucho más lento que nosotros. Tan lento, realmente, que ante las formas ordinarias de percepción parecen no reaccionar

* Aquí podríamos llamarle Pepe el ingenioso. (*N. del T.*)

en absoluto. Si eso es así, ¿cómo podemos decir con certeza que las rocas e incluso las montañas no reaccionan como organismos vivos, pero con una reacción de tiempo tan lenta que para captarla, incluso con fotografía de tomas a intervalos, se requerirían miles de años entre cada toma. Naturalmente no hay forma de probar una cosa así, pero tampoco hay forma de probar que no sea cierto. La distinción entre vida y no-vida no es tan sencilla de establecer.

—Eso es inteligente — pensamos —, pero desde un punto de vista práctico no puede observarse que la materia inerte responda a los estímulos. Y no puede negarse que los seres humanos lo hacen así.

—Otro error — contradice de Wit leyendo nuestros pensamientos —. Todo químico puede comprobar que la mayor parte de los productos químicos (que por lo general provienen de las tierras y las rocas) reaccionan a los estímulos. Bajo las condiciones apropiadas, por ejemplo, el sodio reacciona ante el cloro (formando el cloruro de sodio), el hierro reacciona ante el oxígeno formando el óxido de hierro, y así podríamos seguir citando ejemplos. Reaccionan exactamente igual que el ser humano hambriento ante los alimentos, o ante el afecto cuando se encuentra solo.

—Bien, así es — admitimos —, pero no nos parece jugar limpio comparar una reacción química con una reacción humana. Una reacción química sucede o no sucede. No hay términos intermedios. Cuando dos productos químicos de un determinado tipo se combinan apropiadamente, reaccionan; si no se combinan adecuadamente, no reaccionan. Los seres humanos y sus reacciones son mucho más complejos. Si ofrecemos comida a una persona hambrienta, puede comer o no comer, según las circunstancias; si come, puede comer hasta hartarse, o quizá no tanto. Consideremos a una persona que tiene hambre, pero sabe que si se entretiene comiendo llegará tarde a una cita. Si la cita es lo suficientemente importante, se irá sin comer, pese a tener hambre. Si una persona sabe que la comida está envenenada no la probará. Se trata de procesar la información y responder apropiadamente. Eso es lo que distingue a la reacción humana de la reacción química. Los productos químicos no tienen elección: siempre tienen que actuar en un sentido u otro.

—Desde luego — se excita Jim de Wit —, pero no sabemos si nuestras respuestas a los estímulos no están tan rígidamente preprogramadas como las de los productos químicos, con la única diferencia de que nuestros programas son mucho más complejos. Es muy posible que nosotros no tengamos más libertad de acción, en absoluto, que las piedras. ¡Lo que ocurre es que, contrariamente a las piedras, nosotros nos engañamos creyendo tenerla!

No hay forma de discutir ese argumento. De Witt ha mostrado la cualidad arbitraria de nuestros prejuicios. Nos gusta pensar que somos distintos de las piedras porque somos cosas vivas y ellas no, pero no tenemos forma de probar nuestra posición ni desmentir la suya. No podemos establecer con claridad que somos diferentes a lo inorgánico. Esto significa, lógicamente, que hemos de admitir la posibilidad de que no estemos vivos.

Puesto que esto es absurdo, la única alternativa que nos queda es admitir que los objetos «inanimados» puedan ser entes vivos.

La diferencia entre orgánico e inorgánico es un prejuicio conceptual. Cuesta cada vez más trabajo mantenerlo, a medida que nos adentramos en la física cuántica. De acuerdo con nuestra definición, una cosa es orgánica si responde a la información procesada. ¡El más sorprendente descubrimiento que espera a los neófitos en la física es que las pruebas acumuladas en el desarrollo de la mecánica cuántica indican que las «partículas» subatómicas parecen estar tomando decisiones de manera constante! Y más aún: las decisiones que aparentemente tomen están basadas en otras decisiones programadas en cualquier otra parte. Las partículas subatómicas parecen conocer *instantáneamente* las decisiones que son tomadas en otras partes. La palabra clave es *instantáneamente.* ¿Cómo puede saber una partícula subatómica *aquí* la decisión que ha tomado otra partícula *allí,* en cualquier otra parte, *en el mismo instante en que la partícula en ese otro cualquier lugar la ha tomado*? Todas las pruebas parecen desmentir el hecho de que las partículas elementales sean realmente partículas.

Una partícula, como nos la representamos mentalmente (de acuerdo con la definición clásica) es una cosa que está limitada en el espacio. No se extiende fuera de esa región. Está aquí o está allí, pero no puede estar *aquí* y allí al mismo tiempo.

Una partícula que está aquí, puede comunicarse con una partícula que está allí (gritándole, emitiéndole una señal de TV, agitándose, etc.), pero esa comunicación necesita tiempo (aunque sólo sea una millonésima de segundo). Si dos partículas se encontraran en distintas galaxias la comunicación tardaría siglos. Para que una partícula que está *aquí* sepa lo que ocurre *allí* mientras está sucediendo, tiene que estar *allí.* Pero si está allí no puede estar aquí. Y si está en los dos lugares al mismo tiempo ya no es una partícula.

Esto significa que es posible que las «partículas» ni siquiera sean partículas en absoluto (pág. 51). También significa que esas partículas aparentes están en relación con otras partículas de un modo dinámico e íntimo que coincide con nuestra definición de lo orgánico.

Algunos biólogos creen que una simple célula vegetal lleva en sí la capacidad de reproducir la planta entera. Igualmente, la implicación filosófica de la mecánica cuántica es que todas las cosas en nuestro universo (incluso nosotros), que parecen existir independientemente, son en realidad partes de un modelo orgánico que lo abarca todo. Y que no hay ninguna parte de ese modelo, de ese todo, que esté verdaderamente aparte de él o de las demás partes.

Para entender estas conclusiones y su significado, permítasenos comenzar con un descubrimiento hecho en 1900 por Max Planck. Ese año está considerado por lo general como el del nacimiento de la mecánica cuántica. En diciembre de 1900, como a disgusto, Planck presentó a la comunidad científica un escrito que habría de hacerlo famoso. Él mismo estaba

molesto con las implicaciones de su tesis y confiaba en que sus colegas estarían en condiciones de hacer lo que él no había logrado: explicar su contenido en términos de la física de Newton. Pero en el fondo de su corazón sabía que eso no era posible, que ni ellos ni nadie podría hacerlo. También presentía, y con toda razón, que su comunicado iba a conmover los auténticos cimientos de la ciencia.

¿Qué era lo que había descubierto Planck que le causaba tan profunda inquietud? Que la estructura básica de la naturaleza es granular o, como les gusta decir a los físicos, «discontinua».

¿Qué se quiere expresar con «discontinua»?

Si tomamos la población de una ciudad es evidente que sólo puede fluctuar en un número completo de gente. Lo máximo que la población de una ciudad puede aumentar o disminuir es en una persona. No puede aumentar en 0,7 personas. Puede aumentar o disminuir en 15 personas, pero no en 15,7 personas. En el dialecto de la física, una población puede cambiar solamente en discretos incrementos o discontinuamente. Sólo podemos hacer que sea mayor o más pequeña a saltos y el más pequeño de los saltos tiene que ser una persona completa. En general, esto es lo que descubrió Planck sobre el proceder de la naturaleza.

Planck no intentaba minar los fundamentos de la física de Newton. Era un físico alemán, conservador. Más bien ocurrió que, inadvertidamente, patrocinó la revolución de la mecánica cuántica al tratar de resolver un problema concreto relacionado con las radiaciones de la energía.

Planck estaba tratando de descubrir por qué las cosas se comportan como lo hacen cuando son calentadas. Concretamente, quería saber por qué los objetos se hacen más brillantes cuando se calientan y cambian de color cuando la temperatura aumenta o disminuye.

La física clásica que había tenido éxito en unificar campos tan diversos como la acústica, la óptica o la astronomía, que parecía haber satisfecho el apetito científico de los que creían haber desvelado los misterios del universo y los habían vuelto a reagrupar en cómodos paquetes, no tenía una explicación con sentido para este fenómeno tan corriente. Era, para emplear la fraseología de la época, una de las pocas nubes en el horizonte de la física clásica.

En 1900 los físicos se figuraban al átomo como un núcleo que tenía un aspecto parecido a una ciruela a la que se habían unido unos pequeños muelles protuberantes. (Esto era antes de que se creara el modelo planetario del átomo.) Al final de cada uno de esos muelles estaba el electrón. Si se le daba una sacudida al átomo eso hacía que sus electrones oscilaran al final de sus muelles. Se pensaba que esos electrones cimbreantes (oscilantes) emitían energía radiante y ésa era la causa de que los objetos calientes brillaran. (Una carga eléctrica acelerada crea radiaciones electromagnéticas. Un electrón lleva una carga eléctrica — negativa — y si es sometido a oscilaciones se acelera, primero en una dirección y después en la otra.)

Los físicos pensaban que al calentar los átomos de un metal se le hacía

entrar en estado de agitación y eso, a su vez, hacía oscilar a sus electrones y emitir luz en el proceso. La energía absorbida por el átomo cuando se le sacudía (calentaba) — continuaba la teoría — era radiada por los electrones saltarines. (Se puede substituir «electrones saltarines» por «osciladores atómicos», si hay alguien a quien lo primero no le parece lo suficientemente serio.)

La misma teoría proclamaba que la energía absorbida por un átomo era distribuida por igual a sus osciladores (electrones) y que éstos saltaban (oscilaban) a más alta frecuencia (con mayor rapidez), con lo cual radiaban su energía de manera más eficiente.

Desgraciadamente esta teoría no es válida. «Prueba» algunas cosas bastante equivocadas. Primero, «prueba» que todos los objetos calentados emiten mayor cantidad de luz de alta frecuencia (azul, violeta) que de luz de baja frecuencia (roja). En otras palabras, incluso los objetos moderadamente calentados, de acuerdo con esta teoría clásica, debían emitir una luz de un intenso color azul-blanco, al igual que los objetos que están al rojo blanco, pero en menor cantidad. Esto es incorrecto: objetos moderadamente calentados emiten, principalmente, luz roja. Los objetos intensamente calentados emiten una cantidad finita de luz de alta frecuencia.

El lector no debe preocuparse con altas y bajas frecuencias. Esos términos serán explicados pronto. Ahora la cuestión es que Planck estaba explorando uno de los últimos grandes problemas de la física clásica: su equivocada predicción referente a la radiación energética. Los físicos han apodado a ese problema «La Catástrofe Ultra-Violeta». Aun cuando el nombre suena como el de una orquesta de rock, «La Catástrofe Ultra-Violeta» refleja una concreta preocupación por el hecho de que los objetos calentados no emiten grandes cantidades de energía en forma de luz ultravioleta (la luz de mayor frecuencia conocida en 1900) tal y como había pronosticado la teoría clásica.

El nombre del fenómeno que Planck estaba estudiando es radiación de los cuerpos negros. La radiación de los cuerpos negros es la radiación procedente de cuerpos negros, no reflectantes, planos y perfectamente absorbentes. Dado que el negro es la ausencia de color (no es reflejado ni emitido ningún tipo de luz), los cuerpos negros no tienen color, salvo cuando son calentados. Si un cuerpo negro está emitiendo algún color, sabemos que se debe a la energía que le añadimos y no porque refleje o emita aquel color de manera espontánea.

Un «cuerpo negro», no siempre tiene que ser un cuerpo sólido de color negro. Supongamos que tenemos una caja de metal que está completamente cerrada herméticamente, con la excepción de un pequeño agujero. ¿Qué es lo que veremos si miramos en su interior? Nada, porque no hay luz en su interior. (Una luz pequeña puede penetrar por el agujero, pero no la suficiente como para hacernos ver el interior.)

Bien, supongamos que calentamos la caja metálica hasta que adquiere un color rojo. ¿Qué veremos entonces? Rojo. (¿Quién dice que la física es difícil?) Ése era el tipo de fenómeno que Planck estaba estudiando.

Todos los físicos, en 1900, presumían que después de que los electrones de un átomo excitado comenzaban a oscilar, radiaban su energía suavemente y de manera continuada hasta que descendían «corriendo» y su energía se disipaba. Planck descubrió que los osciladores atómicos excitados no actuaban así. ¡Emitían y absorbían energía sólo en cantidades concretas! En vez de radiar energía suave y continuadamente, como lo hace el resorte de un reloj, radiaban su energía en cortos chorros, descendiendo a un nivel energético más bajo después de cada emisión o chorro, hasta que cesaba de oscilar por completo. En resumen, Planck descubrió que los cambios de naturaleza eran «explosivos» y no continuados y suaves.*

Planck fue el primer físico que habló de «paquetes de energía» y de «osciladores quantificados». Presentía que había hecho un importantísimo descubrimiento, uno que se enfrentaba con los descubrimientos de Newton. Y con razón. La filosofía y los paradigmas de la física nunca volverían a ser los mismos, aunque se necesitarían otros veinticinco años para que la «mecánica cuántica» adquiriera forma.

Es difícil en la actualidad comprender lo audaz que era en su época la teoría de los quantos de Planck. Victor Guillemin, profesor de física en Harvard, lo expresó de este modo:

> (Planck) «tenía que hacer una suposición radical y aparentemente absurda, pues de acuerdo con las leyes clásicas, y también del sentido común, se venía presumiendo que un oscilador electrónico una vez puesto en movimiento por un empuje, radiaba su energía suave y gradualmente mientras su movimiento oscilatorio iba descendiendo hasta detenerse. Planck tuvo que suponer que el oscilador emitía su radiación en chorros repentinos, descendiendo a menores amplitudes de oscilación tras cada una de estas emisiones. Tenía que dar por sentado que la energía de movimiento de cada oscilador no puede aumentar ni disminuir suave y gradualmente, sino únicamente a saltos repentinos. En una situación en la cual la energía estaba siendo transferida de y a los osciladores y las ondas lumínicas, los osciladores no sólo debían *emitir* sino también *absorber* energía radiante en "paquetes" discretos... Ideó el nombre de quantos para los paquetes de energía y dijo de los osciladores que estaban "quantificados". Fue de ese modo como el incisivo concepto del *quantum* entró en la ciencia física».[1]

Planck es no sólo el padre de la mecánica cuántica, sino también el descubridor de la constante que lleva su nombre. La constante de Planck es un número que nunca cambia.** Se utiliza para calcular el tamaño de los

* «... la hipótesis de los quantos ha llevado a la idea de que hay cambios que no ocurren de manera continuada, sino de forma explosiva»», Max Planck, *Neue Bahne der physikalischen Erkenntnis*, 1913, traduc. F. d'Albe, Phil. Mag., vol. 28, 1914.

** $h = 6{,}63 \times 10^{-27}$ erg — sec.

paquetes de energía (quantos) de cada frecuencia de luz (color). (La energía en cada quanto de luz de un color en particular es la frecuencia de la luz multiplicada por la constante de Planck.)

Cada uno de los paquetes de energía de cada color tienen la misma cantidad de energía. Todos los paquetes de energía de luz roja, por ejemplo, son del mismo tamaño. Todos los paquetes de energía de luz violeta son del mismo tamaño. Todos los paquetes de energía de luz verde son del mismo tamaño. Sin embargo, los paquetes de energía de luz violeta son mayores que los paquetes de energía de luz verde y los paquetes de energía de luz verde son mayores que los de luz roja.

En otras palabras, Planck descubrió que la energía es absorbida y emitida a pequeños «trozos» y el tamaño de los trozos de una luz de baja frecuencia, como la luz roja, es más pequeño que el tamaño de los trozos de una luz de alta frecuencia como la luz violeta. Eso explica el porqué los objetos calentados radían la energía del modo como lo hacen.

Cuando un cuerpo negro es sometido a bajo calentamiento, el primer color en el que brilla es rojo, porque los paquetes de energía de la luz roja son los paquetes de energía más pequeños en el espectro de luz visible. A medida que el calor aumenta, se dispone de más energía y se pueden utilizar mayores paquetes de ella. Los mayores paquetes de energía forman los colores de más alta frecuencia, como por ejemplo el azul y el violeta.

¿Por qué el resplandor de un metal caliente parece aumentar continuamente a medida que la temperatura crece? Porque los diminutos «pasos», arriba y abajo, en la brillantez son tan increíblemente pequeños que nuestros ojos no pueden distinguirlos. Por consiguiente en la escala a gran tamaño, o a nivel macroscópico, este aspecto de la naturaleza no es evidente. En el mundo de lo subatómico, sin embargo, ésta es la característica dominante de la naturaleza.

Si esta exposición de la emisión y absorción de los paquetes de energía les recuerda a Niels Bohr (pág. 34) tendrán razón. Sin embargo, Bohr no habría de llegar a su teoría de las órbitas específicas de los electrones hasta trece años después. Para esos días los físicos habían desestimado ya el modelo del átomo de la ciruela con sus electrones saltarines en favor del modelo planetario del átomo, en el cual los electrones giran en torno a un núcleo.*

* Bohr especuló que las órbitas electrónicas estaban ordenadas por la naturaleza a distancias específicas invariables del núcleo del átomo y que, cuando absorbían energía, los electrones en el átomo saltaban hacia fuera desde la órbita más próxima al núcleo (el «estado fundamental» del átomo) y finalmente regresaban a la órbita más interna, emitiendo en ese proceso de vuelta paquetes de energía iguales a los que habían absorbido en sus saltos hacia las órbitas exteriores. Bohr propuso que cuando sólo se disponía de una pequeña cantidad de energía (calor bajo) sólo los paquetes de energía pequeños eran absorbidos por los electrones y, por lo tanto, éstos no saltaban a las órbitas exteriores. Cuando regresaban desde ellas a su más bajo nivel de energía, sólo emitían paquetes de energía pequeños, como los de la luz roja. Cuando se dispone de mayor cantidad de energía (calor

Entre el descubrimiento del quanto por Planck (1900) y el análisis de espectro del hidrógeno realizado por Bohr (1913), un físico brillante irrumpió en la escena con una fuerza raramente ejercida por un individuo aislado. Su nombre: Albert Einstein. En sólo un año (1905) aquel en que cumplía los veintiséis, Einstein publicó cinco trabajos científicos muy significativos. Tres de ellos fueron fundamentales para el desarrollo de la física y, andando el tiempo, para el desenvolvimiento del mundo occidental. La primera de esas tres publicaciones describía la naturaleza cuántica de la luz. Esto le valió el Premio Nobel que le fue concedido en 1921. El segundo escrito describía el movimiento molecular.* Su tercer escrito desarrollaba la teoría especial de la relatividad que estudiaremos después.**

La teoría de la luz de Einstein establecía que la luz estaba compuesta por pequeñísimas partículas. Un rayo de luz, venía a decir Einstein, es análogo a una ráfaga de balas. Cada uno de los proyectiles es llamado un fotón. Eso era parecido a lo que proponía Planck, pero Einstein iba un poco más lejos. Planck descubrió que la energía era absorbida y emitida en paquetes. *Describió* los procesos de absorción y emisión de la energía. Einstein sentó la teoría de que la *energía* en sí está cuantificada.

Para probar su teoría recurrió a un fenómeno llamado el efecto fotoeléctrico. Cuando la luz golpea (incide) en la superficie de un metal hace saltar electrones liberados de los átomos del metal y los manda a paseo. Con el equipo adecuado pueden contarse estos electrones y medir la velocidad con que se desplazan.

La teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico era que cada vez que uno de los proyectiles o fotones chocaba con un electrón lo hacía retroceder, lo desviaba, exactamente igual que una bola de billar aparta a aquella con la cual choca.

Einstein basaba su revolucionaria teoría en la obra experimental de Philippe Lenard (que ganó el Premio Nobel en 1905). Lenard demostró que el flujo de electrones en el efecto fotoeléctrico comenzaba tan pronto como la luz incidente golpeaba el metal que constituía su objetivo. En el mismo momento en que se encendía la luz comenzaban a saltar los electrones. De acuerdo con la teoría ondulatoria de la luz los electrones de un metal sólo comienzan a oscilar cuando son alcanzados por las ondas lumínicas. Los electrones no debían soltarse de los átomos del metal hasta que

---

elevado) se dispone de paquetes de energía mayores, los electrones hacen saltos más largos hacia las órbitas exteriores y, al regresar a las órbitas interiores, emiten mayores paquetes de energía como los de la luz azul o violeta. Por consiguiente, cuando está sometido a calor bajo, el metal adquiere un resplandor rojo y, sometido a calor elevado, su resplandor es blanco azulado.

* Este trabajo reivindicaba la teoría atómica de la materia, de Ludwig Boltzmann, el cual se había suicidado sólo dos meses antes de que esa obra de Einstein fuera publicada.

** Cada uno de los escritos publicados por Einstein en 1905 se ocupaba de una constante física fundamental: h, la constante de Planck (la hipótesis de los fotones); k, la constante de Boltzmann (el análisis del movimiento browniano), y c, la velocidad de la luz (la teoría especial de la relatividad).

comenzaran a oscilar con la suficiente rapidez. Eso exigía varias oscilaciones sucesivas, como cuando se empuja un columpio infantil, cada vez a mayor altura, hasta que el impulso adquirido le hace dar la vuelta en torno a la barra de sujeción.

En resumen: la teoría ondulatoria de la luz predice una emisión de electrones retrasada. Los experimentos de Lenard, por el contrario, demostraban que la emisión de electrones se producía de manera inmediata.

Otro de los descubrimientos de Lenard fue el de que reduciendo la intensidad del rayo de luz incidente (es decir, oscureciéndolo algo más) no se reducía la velocidad de los electrones rebotados, aunque sí el número de éstos. Descubrió, igualmente, que la velocidad de rebote de los electrones podía ser alterada cambiando el *color* de la luz incidente.

Eso quedaba explicado también con la nueva teoría de Einstein. De acuerdo con ésta, cada fotón de un determinado color, como el verde, por ejemplo, tiene una cierta cantidad de energía. Al reducir la intensidad de un rayo de luz verde sólo se reduce el número de fotones en el rayo. Sin embargo, cada uno de los fotones que queda en el rayo lumínico sigue conservando la misma cantidad de energía que cualquier otro fotón de luz verde. Consecuentemente, cuando cualquier fotón de luz verde golpea a un electrón, lo desplaza con una cierta cantidad de energía característica de los fotones de luz verde.

Max Planck describe de este modo la teoría de Einstein:

> «... Los fotones (las "gotas" de energía) no se hacen más pequeños cuando disminuye la energía del rayo; su intensidad permanece inalterada, pero los fotones se siguen uno a otro a intervalos mayores.»[2]

La teoría de Einstein soportaba, pues, el descubrimiento revolucionario de Planck. La luz de alta frecuencia, como la luz violeta, está formada por fotones de más alta energía que la luz de baja frecuencia, como la luz roja. Consecuentemente un rayo de luz violeta, que está compuesto de fotones de alta energía, si golpea a un electrón hace que el electrón rebote con gran velocidad. Cuando es la luz roja, que está compuesta de fotones de baja energía, la que golpea a un electrón éste salta a menor velocidad. En cualquier caso, al aumentar o disminuir la intensidad de la luz aumenta o disminuye el número de electrones que rebotan, pero sólo cambiando el color de la luz incidente se puede cambiar su velocidad.

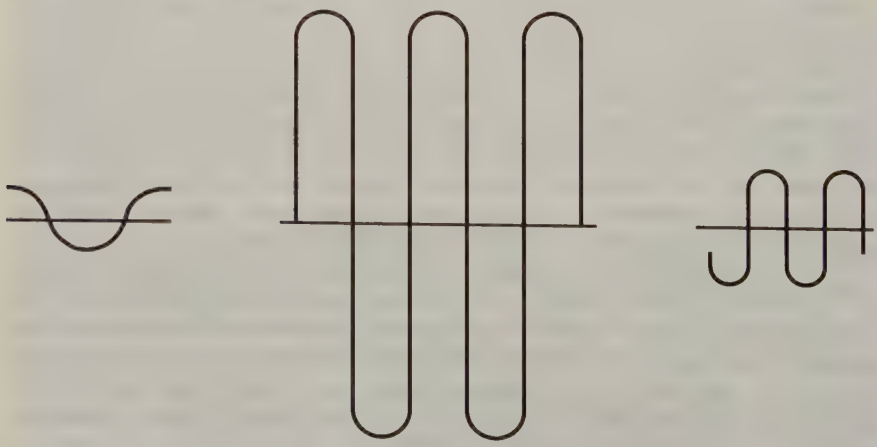
En resumen, Einstein demostró, utilizando el efecto fotoeléctrico, que la luz está formada de partículas, o fotones, y que los fotones de la luz de alta frecuencia tienen mayor energía que los fotones de la luz de baja frecuencia. Eso significó un trascendental logro. El único problema estaba en que ciento dos años antes Thomas Young había demostrado que la luz estaba formada por ondas. Y nadie, ni siquiera Einstein, llegó a estar en condiciones de probar que estaba en un error.

Así llegamos al tema de las ondas. Una partícula es una cosa que está contenida en un lugar. Una onda es algo que se expande.

Veamos una representación gráfica de la onda:

La *longitud de onda* es la distancia entre la cresta de una onda y la siguiente. Las ondas de radio más largas tienen una longitud de diez kilómetros. En cambio las de los rayos X sólo miden una milmillonésima parte de un centímetro. La luz visible tiene longitudes de onda que van de cuatro a siete cienmilésimas de centímetro.

La *amplitud* de una onda es la altura de la cresta de la onda sobre la línea longitudinal de su desplazamiento. En el dibujo siguiente ofrecemos tres ondas con distintas amplitudes. La del centro tiene la mayor amplitud.



La *frecuencia* de la onda nos dice cuántas crestas de onda pasan por un punto determinado (como el punto A en el dibujo de la parte superior de la página 70) en un segundo. Si la ola se mueve en la dirección indicada por la flecha y una cresta pasa por el punto A cada segundo, la frecuencia de la onda es de un ciclo por segundo. Si son diez y media las crestas que pasan por el punto A cada segundo, la frecuencia de la onda es de 10,5 ciclos por segundo. Si diez mil crestas pasan el mismo punto cada segundo, la frecuencia de la onda es de 10.000 ciclos por segundo.

La velocidad de la onda puede ser calculada multiplicando la longitud de onda por la frecuencia. Por ejemplo, si la longitud de una onda es de sesenta centímetros y la frecuencia de la onda es de un ciclo por segundo, la onda se moverá sesenta centímetros cada segundo. En consecuencia, su velocidad es de sesenta centímetros por segundo. Si la longitud de la onda es de sesenta centímetros y su frecuencia es de tres ciclos por segundo, la velocidad de la onda será de ciento ochenta centímetros por segundo, porque la onda se mueve a razón de tres longitudes de onda (sesenta centímetros) en cada segundo.

En todo esto no hay nada complicado. Podemos determinar lo rápido que corre un hombre si conocemos la longitud de cada uno de sus pasos y los pasos que da en un segundo. Multiplicando estos dos números obtendremos la velocidad por segundo del corredor. Si sus pasos tienen una longitud de 90 centímetros y da dos pasos por segundo, el hombre correrá a 180 centímetros por segundo (unos seis kilómetros y medio por hora). Lo mismo hacemos con la onda, salvo que utilizamos longitudes de onda en vez de pasos.

Si bien podemos calcular la velocidad de una onda de luz, multiplicando su longitud de onda por su frecuencia, esto no es necesario. Los físicos han descubierto que la velocidad de la luz en el vacío es siempre de unos trescientos mil kilómetros por segundo (299.792,5 km/seg). Esto se aplica igualmente a todas las ondas electromagnéticas. Por consiguiente, todas las ondas luminosas (las azules, las verdes o las rojas, etc.) tienen la misma velocidad que las ondas de radio, rayos X y todas las demás formas de radiación electromagnética. La velocidad de la luz es constante. Se presenta con la letra *c*.

La constante *c*, como ya hemos dicho, es (aproximadamente) 300.000 kilómetros por segundo y nunca varía (eso es lo que la convierte en una «constante»). No importa si la luz «sube» o «baja», si tiene alta frecuencia, una gran o una pequeña longitud de onda, que venga hacia nosotros o que parta de nosotros: su velocidad siempre es de 300.000 km/seg. Esta característica llevó a Albert Einstein a la teoría de la relatividad especial, como veremos después.

Y a nosotros nos permite calcular tanto la frecuencia como la longitud de onda de la luz si conocemos una de ellas. Eso se debe a que el producto de ambas es siempre 300.000 kilómetros por segundo en el vacío. Mientras mayor sea una de ellas, más pequeña tendrá que ser la otra. Por ejemplo, si sabemos que multiplicando dos números el resultado es 12 y si sa-

bemos que uno de los números es 6, en ese caso el otro *tiene que ser* 2. Si uno de los números es 3 el *otro tiene que* ser 4.

Igualmente, mientras más alta sea la frecuencia de la luz, más pequeña será su longitud de onda; mientras más grande la longitud de onda, más pequeña la frecuencia. En otras palabras, la luz de alta frecuencia tiene longitud de onda pequeña y la luz de baja frecuencia tiene longitud de onda grande.

Ahora volvamos al descubrimiento de Planck de que la energía de un quanto de luz crece con la frecuencia. Mientras más alta sea la frecuencia, mayor es su energía. La energía es proporcional a la frecuencia y la constante de Planck es la «constante de proporcionalidad» entre ellas, entre frecuencia y energía. Esta simple relación es muy importante. Es el punto central de la física cuántica: a mayor frecuencia, mayor energía; a menor frecuencia, menor energía.

Cuando juntamos la mecánica de las ondas y el descubrimiento de Planck tenemos lo siguiente: la luz de alta frecuencia, como por ejemplo la luz violeta, tiene longitud de onda pequeña y alta energía; la luz de baja frecuencia, como por ejemplo la luz roja, tiene longitud de onda grande y baja energía.

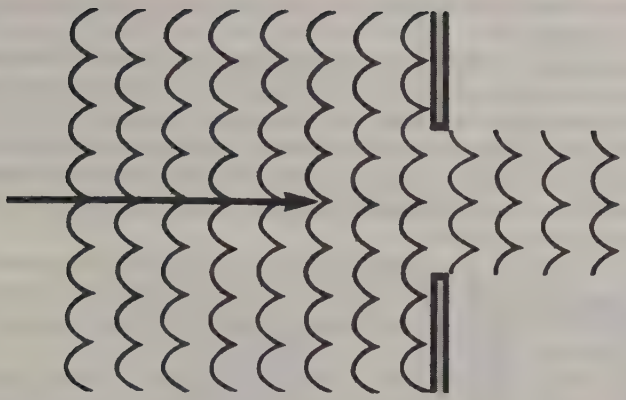
Esto explica el efecto fotoeléctrico. Los fotones de luz violeta golpean a los electrones separados del átomo del metal y los envían lejos de él a una mayor velocidad que lo hacen los fotones de luz roja, porque los fotones de la luz violeta, que es luz de alta frecuencia, tienen mayor energía que los fotones de luz roja, que es luz de baja frecuencia.

Todo esto parece tener sentido si se prescinde del hecho de que estamos hablando de partículas (fotones) en término de ondas (frecuencia), y de ondas (frecuencia) en término de partículas (fotones), lo cual, desde luego, carece en absoluto de sentido.

Si tiene el lector la sensación de que ha comprendido las últimas páginas ¡le felicitamos! Ha logrado dominar las matemáticas más difíciles contenidas en este libro. Si no, vuelva a la página 70 y vuelva a relerlas. Es fácil danzar con las longitudes de onda y las frecuencias, si se conoce la forma como están conectadas entre sí.

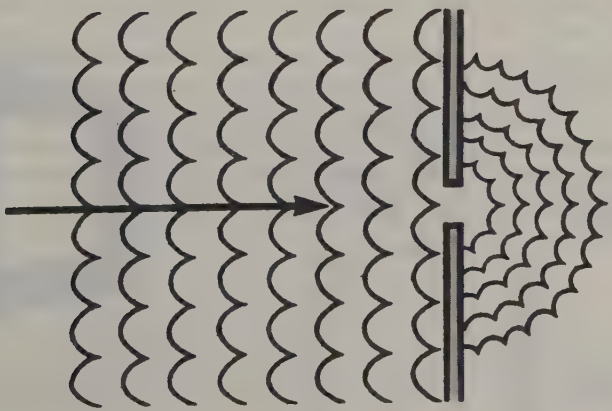
Las ondas son criaturas alegres que gustan de bailar por su cuenta. Por ejemplo, en determinadas circunstancias se doblan alrededor de los cantos o perfiles agudos. Cuando esto sucede se dice que hay difracción.

Supongamos que nos encontramos a bordo de un helicóptero que vuela sobre un puerto artificial. La boca o entrada del puerto es lo suficientemente ancha para permitir que dos portaviones puedan cruzarse al pasar por ella. El mar está agitado y el viento y las olas (ondas) van en dirección perpendicular a la entrada del puerto. Si desde el helicóptero miramos habia abajo ésta será la forma como veremos que las olas (ondas) penetrar en el interior del puerto:



Se ve que las olas son detenidas limpiamente por los muros del puerto, excepto en su entrada, por donde continúan en línea recta hacia el interior del puerto hasta que se disipan.

Ahora imaginemos que la boca del puerto es tan pequeña que apenas permite la entrada de una barca. Si miramos desde arriba, desde el helicóptero, el modelo que veremos será de todo punto diferente.



En vez de moverse directamente hacia el interior, las olas que ya están dentro se van extendiendo desde la entrada del puerto casi del mismo modo como si fueran las ondas de un charco que se alejan del punto del agua en el que hubiéramos dejado caer una piedra. Esto es la difracción.

¿Por qué ocurre así? ¿Por qué la reducción de la anchura de la boca

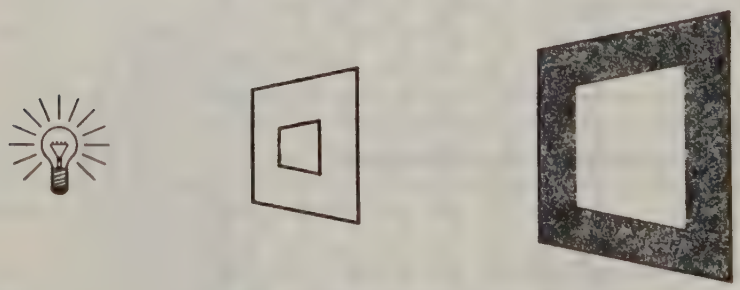
de entrada del puerto hace que las olas, dentro del puerto, se extiendan en forma de semicírculo?

La respuesta la encontraremos comparando el tamaño de la entrada del puerto con la longitud de onda — es decir, de la distancia entre las crestas de las olas que llegan —. En el caso primeramente citado, la boca del puerto es considerablemente más ancha que la distancia entre las crestas de las olas (longitud de onda) que penetran por ella, así que las olas siguen directamente, en línea recta, siguiendo la pauta normal de conducta de las olas, y se adentran en el puerto.

En el segundo de los casos la anchura de la boca del puerto es, aproximadamente, la misma o un poco menos, que la longitud de onda, de las olas que llegan y, así, causa la forma característica (difracción), que nos ofrece el segundo dibujo.

Cualquiera que sea el tipo de ondas que pasan a través de una apertura que es tan pequeña, o más, que la longitud de onda de las que pasan por ella, las ondas se difractan al pasar.

Dado que la luz es un fenómeno ondulatorio (de acuerdo con la teoría que defiende la naturaleza ondulatoria de la luz) ésta deberá comportarse de manera semejante que las olas del mar, en los ejemplos citados anteriormente. Y así lo hace. Si colocamos una fuente de luz detrás de una pantalla con un orificio cuadrado, como el que representamos en el dibujo que sigue, su proyección en la pared será tal y como lo vemos en él:



Esto es análogo a lo que ocurre a las olas que penetran en el puerto de ancha boca de entrada. El cuadrado cortado en el panel es millones de veces mayor que la longitud de onda de la luz. Como resultado de ello, las ondas de la luz pasan directamente por él, siguiendo las líneas rectas y proyectando en la pared una imagen con la misma forma que el cuadrado. Ob-

servemos, especialmente, que esta proyección tiene bordes muy marcados y definidos entre la zona iluminada y la zona oscura.

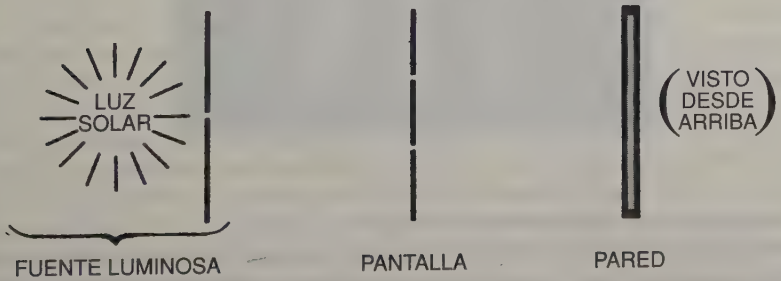
Si abrimos una rendija no más ancha que el corte de una hoja de afeitar, de manera que su anchura sea casi tan estrecha como la longitud de onda de la luz incidente, la luz se difracta. Desaparece el borde fuertemente marcado entre la zona de luz y la zona oscura y, en su lugar, vemos una zona iluminada que va disminuyendo en su intensidad, paulatinamente, hasta llegar a la oscuridad en sus bordes. En vez de llegar en línea recta a

la pared del fondo, los rayos de luz se han abierto como un abanico. Esto es luz difractada.

Ahora que el lector conoce ya la gracia, vamos a contarle el chiste.

El año 1803, Thomas Young estableció de una vez para siempre, o así lo creyó, la cuestión de la naturaleza de la luz. Utilizó para ello un experimento que era al mismo tiempo simple y espectacular:

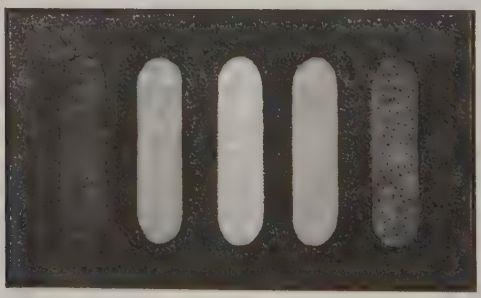
Frente a una fuente de luz (Young usó luz solar que penetraba por un aguero en una pantalla) colocó una pantalla con dos cortes verticales en ella. Cada uno de los agujeros podía ser tapado con un trozo de tela.



Al otro lado de la pantalla con el doble corte había una pared en la cual podía incidir la luz que penetraba por las dos rendijas. Cuando se dejó incidir la fuente de luz y una de las rendijas se tapó, la pared se iluminó como puede verse en el primer dibujo de esta página.

Pero al destapar Young las dos rendijas hizo historia; la proyección en la pared debía ser la suma de la luz de los dos cortes, pero no fue así. ¡En vez de ello la pared se iluminó con bandas alternativas de luz y oscu-

ridad! La banda del centro era la más luminosa. A ambos lados de la banda luminosa central había bandas de oscuridad; después nuevas bandas de luz, pero menos intensas que la banda del centro, después nuevas bandas de oscuridad, etc., como se ve en el dibujo siguiente.



¿Por qué ocurría una cosa así?

La simplicidad de la respuesta es lo que hace tan importante a este experimento. Las bandas alternativas de luz y oscuridad eran un fenómeno bien conocido de la mecánica ondulatoria llamado interferencia. La interferencia resulta cuando las ondas de luz difractada procedente de los

dos cortes interfieren entre sí. En algunos lugares las dos ondas se superponen y se refuerzan una a otra. En otros lugares se cancelan.

En las zonas donde una cresta de onda se superponía a otra cresta de onda el resultado era una intensificación de luz (las bandas luminosas). En zonas donde la cresta encontraba un seno, se cancelaban mutuamente y la luz no llegaba a la pared.

Es lo mismo que si lanzamos simultáneamente dos piedras en un estanque y observamos cómo las ondas se extienden partiendo de sus puntos centrales (los de choque de la piedra). Las ondas causadas por las piedras interfieren entre sí. En los lugares donde las crestas de las ondas causadas por una piedra se encuentran con las crestas de las ondas causadas por la otra piedra, el resultado son ondas mayores. En lugares donde los senos de las olas causadas por una de las piedras coinciden con las crestas de las olas originadas por la caída de la otra piedra, el agua se calma.

En resumen: el experimento de las dos rendijas de Young demostró que la luz debía ser de naturaleza semejante a las ondas, porque sólo las ondas pueden causar modelos de interferencia. La situación, pues, era como sigue: Einstein, utilizando el efecto fotoeléctrico, «probó» que la luz es de naturaleza semejante a las partículas. Y Young, utilizando el fenómeno de interferencia, «probó» que la luz era de naturaleza semejante a las ondas. Pero una onda no puede ser una partícula ni una partícula no puede ser una onda.

¡Esto es sólo el principio! Dado que Einstein «probó» que la luz estaba compuesta de fotones, volvamos al experimento de Young y realicémoslo con fotones: cosa que se ha hecho ya. Supongamos que tenemos una pistola de luz que puede disparar un solo fotón por separado, es decir como una pistola dispara las balas, una tras otra. El experimento se preparó como la vez anterior con sólo una rendija abierta. Disparamos el fotón, pasa por la rendija y marcamos el lugar donde tomó la pared (empleando una placa fotográfica). Puesto que hicimos el otro experimento anteriormente apreciamos que el fotón ha dado en una zona que estaría oscura si la segunda rendija hubiera estado también abierta. Es decir, que si la segunda rendija hubiera estado abierta, allí no hubiera tocado ningún fotón.

Para estar más seguros repetimos el experimento, dejando abiertas las dos rendijas. Tal y como habíamos pensado, ningún fotón fue registrado en la zona donde dio el fotón cuando sólo una rendija estaba abierta. Cuando ambas rendijas están abiertas se presenta una interferencia y esa zona queda en medio de una de las bandas de oscuridad.

La pregunta es: «*¿Cómo sabía el fotón en el primer experimento que la segunda rendija no estaba abierta?* Vale la pena pensar en ello. Si ambas rendijas están destapadas, siempre existen bandas alternativas de luz y oscuridad. Esto significa que hay zonas en las que nunca toca un fotón (de no ser así no habría ninguna zona de oscuridad). Si una de las rendijas está cerrada no se producen interferencias y las bandas desaparecen: todas las zonas se iluminan, incluso aquellas que quedaban a oscuras cuan-

do ambas rendijas estaban abiertas.

Cuando «disparamos» nuestro fotón y éste pasa por la primera rendija, ¿«sabe» que puede ir a una zona que tendría que estar en la oscuridad si ambas rendijas estuvieran abiertas? O, en otras palabras, ¿cómo sabe el fotón que la otra rendija está cerrada?

> «El misterio central de la teoría del quanto — escribió Henry Stapp — es cómo se transmite la información tan rápidamente. ¿Cómo sabe la partícula que hay dos rendijas abiertas? ¿Cómo es recogida esa información de algo que ocurre en otra parte para determinar lo que es probable que suceda aquí?»[3]

No hay respuesta definitiva a esta cuestión. ¡Algunos físicos como E. H. Walker especulan con la posibilidad de que los fotones sean *conscientes*!

> «La consciencia podría estar asociada en todos los procesos de la mecánica cuántica... puesto que todo lo que sucede, en definitiva, es el resultado de uno o varios sucesos de la mecánica cuántica, el universo está «habitado» por un número casi ilimitado de entidades discretas y conscientes, no pensantes, que son responsables del trabajo detallado del universo.»[4]

Esté o no esté Walker en lo cierto, lo que sí aparece claro es que si en realidad hay fotones (y el efecto fotoeléctrico prueba que los hay), los fotones en el experimento con la doble rendija «saben» de algún modo si las dos rendijas están o no abiertas y «actúan» de acuerdo con ello.*

Esto nos lleva de vuelta hacia el lugar donde declaramos: algo es «orgánico» si tiene la habilidad de procesar información y actúa de acuerdo con ella. No nos queda más remedio que reconocer que los fotones, que son energía, parecen procesar información y actúan de acuerdo con ello. Por consiguiente, los fotones parecen ser orgánicos. Puesto que el ser humano es también orgánico existe la posibilidad de que el estudio de los fotones (y otros quantos de energía) podrían llevarnos a aprender algo sobre nosotros mismos.

La dualidad onda-partícula significó el final de la línea que llevaba a la causalidad clásica. De acuerdo con esta forma de pensar, si conocemos ciertas condiciones iniciales, podemos predecir el futuro de los acontecimientos porque conocemos las leyes que los gobiernan. En el experimento de la doble rendija sabemos todo lo que podemos saber sobre las condiciones iniciales y, sin embargo, no podemos predecir correctamente lo que les sucederá a los fotones individualizados.

En el experimento primero (sólo una rendija abierta), sabemos el ori-

*** Otra explicación distinta a la de «saber» podría ser la sincronicidad, el principio de conexión no causal de Jung.**

gen del fotón (la lámpara), su velocidad (300.000 kilómetros por segundo) y su dirección inmediatamente antes de pasar por la rendija. Utilizando las leyes del movimiento de Newton podemos predecir en qué lugar de la placa fotográfica chocará el fotón. Supongamos que hacemos esos cálculos.

Pasemos a considerar el segundo experimento (con las dos rendijas abiertas). También en este caso conocemos el origen del fotón, su velocidad y su dirección antes de pasar por la rendija abierta. Las condiciones iniciales del fotón en el primer experimento son las mismas que las del fotón en el segundo experimento. Los dos parten del mismo lugar, viajan a la misma velocidad, van al mismo lugar y, en consecuencia, se mueven en la misma dirección, exactamente, en el momento de pasar por la rendija número uno. La única diferencia es que en el segundo experimento la segunda rendija está también abierta. Utilizando las leyes del movimiento de Newton calculemos también aquí el lugar donde chocará el fotón en la placa fotográfica.

Puesto que utilizamos las mismas cifras y las mismas fórmulas en ambos casos, tendremos resultados idénticos que indicarán que el fotón en el primer experimento hará impacto en la placa fotográfica, exactamente en el mismo lugar que el fotón en el experimento número dos. ¡Y éste es el problema! El fotón en el experimento número dos no hará impacto en la misma zona en que lo hizo el fotón en el primer experimento, puesto que en éste va a dar en una zona que es una banda negra en el experimento dos. En otras palabras, los dos fotones no van al mismo lugar, aun cuando las condiciones iniciales referidas a ambos son idénticas y conocidas por nosotros.

No podemos determinar el camino a seguir individualmente por los fotones. Podemos saber cuál será la forma ondulatoria en la pared, pero en este caso estamos interesados en un solo fotón, no en sus ondas. En otras palabras, sabemos el modelo que establecerán grandes grupos de fotones y su distribución en el modelo, pero no tenemos modo de saber qué fotones son los que irán a parar allí. Todo lo que podemos decir de un fotón, aislado, es la probabilidad de que lo encontremos en un determinado lugar.

La dualidad onda-partícula fue (es) uno de los más espinosos problemas en la mecánica cuántica. A los físicos les gusta tener teorías limpias y claras que lo expliquen todo, y en caso contrario les gusta tener teorías igualmente claras sobre las razones que les impiden tenerlas. La dualidad onda-partícula no es una situación clara. En realidad es más bien bastante turbia, desordenada y ello ha obligado a los físicos a aceptar nuevos modos de percibir la realidad física. Estos nuevos marcos conceptuales son considerablemente más compatibles con la naturaleza de la experiencia personal que lo fueran los antiguos.

Para la mayor parte de nosotros la vida raramente es blanca o negra. La dualidad onda-partícula señaló el fin de la disyuntiva extrema de *sí o no* a la *hora de referirse al concepto del mundo.* Los físicos ya no pueden aceptar la proposición de que la luz tiene que ser *o bien* una partícula *o*

una onda, porque se han «probado» a sí mismos que es *ambas cosas*, dependiendo de cómo se contemple el fenómeno.

Desde luego que Einstein se daba cuenta del hecho de que su teoría del fotón contradecía la teoría de la naturaleza ondulatoria de Young, pero no podía probar su falsedad. Especuló que los fotones son guiados por «ondas fantasmas». Las ondas fantasmas son entidades matemáticas sin existencia real. Los fotones parecen seguir caminos que tienen todas las características matemáticas de las ondas, pero que en realidad no existen. Algunos físicos siguen considerando de este modo la paradoja onda-partícula, pero para la mayor parte de sus colegas esta explicación resulta demasiado artificial. Se trata de una respuesta que parece tener sentido pero que, realmente, no explica nada.

La dualidad onda-partícula propició, sin duda, el primer paso real para la comprensión de la teoría del quanto que era todavía algo nuevo y sin desarrollar. En el año 1924, Bohr con otros dos de sus colegas, H. A. Kramers y John Slater, estuvieron de acuerdo en sugerir que las ondas en cuestión eran *ondas de probabilidad*. Las ondas de probabilidad serían entes matemáticos mediante las cuales los físicos podrían predecir la probabilidad de que ciertos acontecimientos ocurran o no ocurran. Sus matemáticas no demostraron ser correctas, pero su idea, que era diferente a todo lo que había sido propuesto anteriormente, tenía sentido. Después, con un formalismo diferente (estructura matemática), la idea de las ondas de probabilidad se desarrolló hasta convertirse en una de las más destacadas características de la mecánica cuántica.

Las ondas de probabilidad, tal y cómo pensaban de ellas Bohr, Kramers y Slater, eran una idea enteramente nueva. La probabilidad en sí no era nueva, pero sí lo era ese tipo de probabilidad. Se refería a algo que, de un modo u otro, estaba ya sucediendo pero que todavía no había sido actualizado. Se refería a una *tendencia* a ocurrir, una tendencia que de un modo indefinido existía en sí misma, aun cuando nunca llegara a convertirse en suceso. Las ondas de probabilidad eran un catálogo matemático de esas tendencias.

Eso es, como puede verse, algo bastante diferente de la probabilidad tomada en el sentido clásico. Si tiramos un dado en un casino de juego, sabemos, gracias a la clásica ley de probabilidades, que la posibilidad de obtener un número determinado de antemano es de uno contra seis. Pero la onda de probabilidad de Bohr, Kramers y Slater significa bastante más que eso.

De acuerdo con Heisenberg:

> «Significa una tendencia hacia algo. Era una versión cuantitativa del antiguo concepto de «potencia» en la filosofía aristoteliana. Introducía algo que estaba presente, erguido en el centro, entre la idea de un suceso y el suceso real, una forma extraña de realidad física exactamente en el centro, entre posibilidad y realidad.»[5]

Hacia 1924 el descubrimiento del quanto debido a Planck estaba causando efectos realmente sísmicos en el campo de la física. Llevo a Einstein a descubrir el fotón, lo que a su vez fue causa de la dualidad onda-partícula que llevó a las ondas de probabilidad. La física de Newton era cosa del pasado.

Los físicos se encontraron a sí mismos ocupándose de energía que de un modo u otro procesaba información (lo que la hacía algo orgánico) y que de modo no predecible se presentaba en modelos (ondas).

En resumen: los físicos se encontraron a sí mismos tratando con Wu Li: modelos de energía orgánica.

LO QUE PASA

La mecánica cuántica es un procedimiento. Un modo específico de considerar una parte específica de la realidad. La ventaja de utilizar el procedimiento de la mecánica cuántica es que ello nos permite predecir las *probabilidades* de ciertos resultados siempre y cuando nuestros experimentos sean realizados de un modo determinado. El objeto de la mecánica no es predecir lo que realmente va a suceder. Solamente predice las probabilidades de varios resultados posibles. A los físicos les gustaría estar en condiciones de predecir los sucesos subatómicos de manera más concreta pero, en el momento presente, la mecánica cuántica es la única teoría que hasta ahora ha estado en condiciones de desarrollar que funcione a nivel de los fenómenos subatómicos.

Las probabilidades obedecen a las leyes deterministas. Estas mismas leyes deterministas rigen los sucesos en el mundo de lo macroscópico. Existe entre ellas un paralelismo directo.

Utilizando las rígidas leyes del desarrollo de los procesos podemos calcular, exactamente, cuál es la probabilidad de que ocurra un determinado suceso, si conocemos de manera suficiente las condiciones en las que se inició el experimento.

Por ejemplo, no hay modo de que podamos calcular en qué lugar de una placa fotográfica va a incidir un fotón determinado en el experimento de la doble rendija (pág. 76). Sin embargo podemos predecir con precisión la probabilidad de que vaya a dar en determinado lugar, partiendo de la base de que el experimento haya sido preparado adecuadamente y que los resultados sean medidos de manera apropiada.

Supongamos que hemos calculado que existe un sesenta por ciento de probabilidades de que el fotón vaya a dar en la zona A. ¿Significa eso que puede incidir en cualquier otra parte? Sí. De hecho existen un cuarenta por ciento de posibilidades de que sea así.

En ese caso (permítaseme que haga la pregunta en nombre de Jim de Wit), ¿qué es lo que determina en qué lugar incidirá el fotón? La respuesta dada por la teoría del quanto es: pura casualidad.

Ese aspecto de la casualidad pura era otro de los reparos de Einstein a

la física cuántica. Una de las razones por las que nunca quiso aceptarla como una teoría física fundamental. «La mecánica cuántica es impresionante — escribió en una carta dirigida a Max Born —, ... pero estoy convencido de que Dios no juega a los dados.»[1]

Dos generaciones más tarde, J. S. Bell, un físico suizo, probó que posiblemente estaba en lo cierto, pero ésa es otra historia a la que nos referiremos posteriormente.

El primer paso en el proceso de la mecánica cuántica es preparar un sistema físico (el aparato experimental), de acuerdo con ciertas especificaciones, en una zona llamada región de preparación.

El segundo paso en el procedimiento de la mecánica cuántica es preparar otro sistema físico para medir los resultados del experimento. Este sistema de medida se localiza en una zona llamada región de medida. Idealmente la región de medida debe estar muy alejada de la región de preparación. Desde luego, hay que tener en cuenta que para una partícula subatómica una pequeña distancia macroscópica, incluso pequeña, es un camino muy largo.

Permítasenos, ahora, realizar el experimento de doble rendija usando este procedimiento. Primero colocamos la fuente de luz sobre una mesa y, después, a corta distancia, una pantalla con dos estrechos cortes o aberturas verticales. La zona donde todo ese instrumento está colocado es la región de preparación.

Después pasemos al otro lado de la pantalla — al opuesto a aquel en el que está la luz — y coloquemos allí una placa fotográfica virgen. Ésta es la región de medida.

El tercer paso a dar, siguiendo el procedimiento de la mecánica cuántica, es traducir a términos matemáticos que lo represente todo lo que sabemos sobre el aparato instrumental en la región de preparación (luz y pantalla), y, después, hacer lo mismo con el instrumental situado en la región de medida (la placa fotográfica).

Para poder hacer todo eso, necesitamos conocer los datos específicos del instrumental. En la práctica esto significa que hay que dar al técnico que coloca el equipo instrucciones muy precisas. Le decimos, por ejemplo, la distancia exacta de la fuente de luz a la que tiene que colocar la pantalla, la frecuencia y la intensidad de la luz que vamos a usar, las dimensiones de los dos orificios de la pantalla y sus posiciones relativas entre sí y con respecto a la luz. Igualmente le damos instrucciones explícitas con respecto al instrumental en la región de medida, cómo y dónde debe colocarlo, el tipo de placa fotográfica que vamos a usar, cómo proceder a su revelado, etc. Después de haber traducido estas instrucciones sobre la preparación experimental al lenguaje matemático de la teoría del quanto, colocamos estas cantidades matemáticas en una ecuación que exprese la forma de un desarrollo natural causal. Téngase en cuenta que esta última frase no dice nada sobre lo que se está desarrollando. La razón de ello es que nadie lo sabe. La Interpretación de Copenhague de la Mecánica Cuántica

(pág. 56), dice que la teoría del quanto es una teoría completa porque funciona (correlaciona experiencias), no porque explique en detalle lo que está sucediendo. (La queja de Einstein estaba basada en que la teoría del quanto no explica las cosas por completo, porque se ocupa de la conducta de grupo, y no de sucesos aislados, individuales.)

Sin embargo, cuando se trata de predecir la conducta de grupo, la teoría del quanto actúa como se anuncia. En el experimento de la doble rendija, por ejemplo, puede predecir con exactitud las probabilidades de un fotón de ser detectado en la región A, en la región B, en la región C, y así sucesivamente.

Desde luego, el último paso en el proceso de la mecánica cuántica es, realmente, llevar a cabo el experimento y conseguir un resultado.

Para aplicar la teoría del quanto el mundo físico éste tiene que ser dividido en dos partes. Estas dos partes son el sistema observado y el sistema observador. El sistema observado y el sistema observador no son lo mismo que la región de preparación y la región de medida. «Región de preparación» y «región de medida» son términos que describen la organización física del aparato experimental. «Sistema observado» y «sistema observador», son términos que se refieren al modo como los físicos analizan el experimento (El «sistema» observado no puede ser observado hasta que entra en interacción con el sistema observador e, incluso entonces, todo lo que podemos observar son sus efectos sobre el aparato de medida.)

El sistema observado en el experimento de la doble rendija es un fotón. Se describe como si estuviera viajando entre la región de preparación y la región de la medida. El sistema observador en todos los experimentos de la mecánica cuántica es el ambiente que rodea al sistema observado — incluido el físico que está estudiando el experimento —. Mientras el sistema observado viaja sin ser perturbado («propagándose en aislamiento») se desarrolla de acuerdo con una ley natural causal. Esta ley de desarrollo causal se llama la Ecuación de onda de Schrödinger. La información que colocamos en la ecuación de Schrödinger consiste en los datos sobre los aparatos experimentales que hemos transcrito en el lenguaje matemático de la teoría del quanto.

Cada serie de esas instrucciones experimentales que transcribimos al lenguaje matemático de la teoría del quanto corresponde a los que los físicos llaman un «observable». Observables son las características del experimento y la naturaleza que se consideran fijas o determinadas cuando y si los datos experimentales que hemos transcrito se encuentran reflejados realmente. Podemos transcribir al lenguaje matemático diversos datos experimentales relativos a la región de medida, cada uno de ellos correspondiente a un diferente resultado posible (la posibilidad de que el fotón incida en la región A, la posibilidad de que el fotón incida en la región B, la posibilidad de que el fotón incida en la región C, etc.).

En el mundo de las matemáticas, los datos experimentales de cada una de esas posibles situaciones en la región de medida y en la región de

preparación corresponden a un observable.* En el mundo de la experiencia observable es la posible ocurrencia (la entrada en nuestra experiencia) de una de esa serie de especificaciones.

En otras palabras: lo que ocurre al sistema observable en su camino entre la región de preparación y la región de medida se expresa, matemáticamente, como una *correlación* entre dos observables (producción y detección). Sabemos que el sistema observado (en este experimento) es un fotón.

Por consiguiente, el fotón es una *relación* entre dos observables. Hay una colosal diferencia entre esta idea y el concepto clásico de la física que consideraba a las partículas elementales como los ladrillos que servían para la edificación de toda la materia. Durante siglos, los científicos vinieron tratando de reducir la realidad a entidades indivisibles. No resulta difícil imaginar lo desalentador que debe resultar para ellos haber llegado a una aproximación tan cercana al mundo de lo microscópico (el fotón es una partícula «muy» elemental), para descubrir que las partículas elementales no sólo no son un «ladrillo» sino que ni siquiera tienen existencia propia.

Como escribió Stapp para la Comisión de de Energía Atómica:

> «... una partícula elemental no es un ente que existe independientemente y escapa al análisis. En esencia es un conjunto de relaciones dirigido hacia otras cosas.»[2]

Más aún: la representación matemática que los físicos han construido de esta «serie de relaciones» es muy parecida a la imagen matemática de una partícula real (física) en movimiento.** El movimiento de esta serie de relaciones está gobernado exactamente por la misma ecuación que rige a una partícula real en movimiento.

Decía Stapp:

> «Una correlación de gran alcance entre observables, tiene la interesante propiedad de que la ecuación de movimiento que rige la propagación de este efecto es, precisamente, la ecuación de movimiento de una partícula libre en movimiento.»[3]

En la naturaleza las cosas no están correlacionadas. En la naturaleza las cosas son como son. «Correlación» es un concepto que utilizamos para

* Cada serie de datos experimentales A o B, que pueden ser transcritos a una descripción teórica correspondiente A o B se corresponde a un observable. En la teoría matemática el observable es A o B. En el mundo de la experiencia el observable es la posible concurrencia — realización — (entrada en nuestra experiencia) de los datos especificados.

** La partícula está representada por una función ondulatoria que tiene *casi todas* las características (cuando está apropiadamente potenciada para conseguir una función de probabilidad) de una función de densidad de probabilidad. Sin embargo, carece del aspecto crucial de una función de densidad de probabilidad, es decir, la propiedad de ser positiva.

describir conexiones que percibimos. La palabra «correlación» no existe fuera del ser humano. Esto es porque sólo los seres humanos utilizamos palabras y conceptos.

«Correlación» es un concepto. Las partículas subatómicas son correlaciones. Si los seres humanos no estuviéramos aquí para crearlos no existirían conceptos de ningún tipo, incluyendo el concepto de «correlación». ¡En resumen, si no existiéramos los hombres para hacerlas, no existirían las partículas!*

La mecánica cuántica está basada en el desarrollo aislado de un sistema observado. «Desarrollo aislado» hace referencia al aislamiento que creamos al separar la región de preparación de la región a medida. Llamamos aislamiento a esta situación, pero en realidad nada está completamente aislado, excepto quizá el universo visto en su conjunto. (¿Qué estará aislado de qué?)

El «aislamiento» que nosotros creamos es una idealización y uno de sus puntos de vista es que la mecánica cuántica nos permite idealizar un fotón de la unidad fundamental completa, de manera que podamos estudiarlo. En realidad un «fotón» da la impresión de separarse de la unidad fundamental completa, no rota, *porque* nosotros lo estamos estudiando.

Los fotones no existen por sí mismos. Todo lo que exista por sí mismo es una totalidad inseparable que se presenta ante nosotros como un tejido (más pautas modélicas) de relaciones. Los entes individuales son idealizaciones que corresponden a correlaciones efectuadas por nosotros.

En resumen: de acuerdo con la mecánica cuántica el mundo físico es:

> «No una estructura construida a base de entes independientes y no analizables, sino, más bien, una red de relaciones entre elementos cuyo significado surge de manera total de sus correlaciones con la totalidad» (Stapp).[4]

La nueva física suena con mucho de manera parecida al antiguo misticismo oriental.

* Desde un punto de vista pragmático nada puede decirse del mundo de «allá fuera», excepto por medio de nuestros conceptos. Sin embargo, aun dentro del mundo de nuestros conceptos, las partículas causan la impresión de no tener una existencia independiente. En teoría están representadas sólo por funciones ondulatorias y el significado de una función ondulatoria radica, únicamente, en su correlación con otras cosas (macroscópicas).

Los objetos macroscópicos, como por ejemplo una «mesa» o una «silla» tienen cierto significado directo, experiencial, es decir, que organizamos nuestras experiencias sensoriales sobre ellas en términos directos. Estas experiencias son tales que podemos creer que esos objetos tienen una existencia persistente y una ubicación bien definida en el espacio-tiempo que es, lógicamente, independiente de las demás cosas. No obstante, el concepto de existencia independiente se evapora tan pronto descendemos al nivel de las partículas. Esta limitación de la idea de entes independientes, excluyendo a las partículas, subraya, de acuerdo con el punto de vista del pragmatismo, que incluso mesas y sillas son para nosotros solamente instrumentos para conseguir una *experiencia de correlación.*

Lo que ocurre entre la región de preparación y la región de medida es un desplegar dinámico de las posibilidades de que algo ocurra de acuerdo con la ecuación de onda de Schrödinger. Podemos determinar, en cualquier momento, en el desarrollo de cada una de las posibilidades la probabilidad que tiene cada una de ellas de llegar a ocurrir.

Una de esas posibilidades puede ser la de que el fotón alcance la zona A. Otra posibilidad es que el fotón llegue a la zona B. Sin embargo, resulta imposible que el mismo fotón llegue a las zonas A y B al mismo tiempo. Cuando cualquiera de las dos posibilidades se realiza, la probabilidad de que la otra ocurra se reduce a cero simultáneamente

¿Cómo conseguiremos que una posibilidad se convierta en una realidad? «Realizando una medición.» Al tomar esa medida interferimos en el desarrollo de las posibilidades. En otras palabras: al realizar una medida interferimos en el desarrollo del sistema observado que se hallaba en aislamiento. Al hacerlo actualizamos una de las varias potencialidades que formaban parte del sistema observado mientras estaba aislado (y regido por la ecuación de onda de Schrödinger). Por ejemplo, tan pronto como percibimos un fotón en la región A, la posibilidad de que esté en la zona B, o en cualquier otra, es cero.

El desarrollo de las posibilidades que tiene lugar entre la región de preparación y la región de medida está representado por un tipo especial de ente matemático, a la que los físicos llaman una «función de onda». Este nombre se justifica porque, desde un punto de vista matemático, es semejante al desenvolverse de las ondas, con cambios y proliferación constantes. En pocas palabras: la ecuación de onda de Schrödinger rige el desarrollo del sistema observado (en este caso un fotón) mientras está en aislamiento (entre la región de observación y la región de medida), por lo que en consecuencia, puede ser presentado como una función de onda.

Una función de onda es una ficción matemática que representa todas las posibilidades que pueden sucederle a un sistema observado cuando entra en interacción con un sistema de observación (un instrumento de medida). La forma de la función de onda de un sistema observado puede ser calculado por medio de la ecuación de Schrödinger para cualquier momento comprendido entre el tiempo en que el sistema observado abandona la región de preparación y el tiempo en que entra en interacción con el sistema de observación.

Una vez que es calculada la función de onda podemos realizar con ella una simple operación matemática (elevar al cuadrado su amplitud) para crear un segundo ente matemático llamado una función de probabilidad (o, técnicamente, una «función de densidad de probabilidad»). La función de probabilidad nos dice las probabilidades, en un determinado tiempo, de cada una de las posibilidades representadas en la función de onda. La función de onda se calcula con la ecuación de Schrödinger. Trata de posibilidades. La función de probabilidad está basada en la función de onda. Se ocupa de las probabilidades.

Hay una diferencia entre lo posible y lo probable. Muchas cosas que

no son probables pueden ser posibles, como por ejemplo que nieve en verano (salvo que nos hallemos en el Polo, donde ese fenómeno es al mismo tiempo posible y probable).

La función de onda de un sistema observado es un catálogo matemático que nos ofrece una descripción física de las cosas que pueden sucederle al sistema observado cuando realizamos una medida sobre él. La función de probabilidad nos ofrece las probabilidades de que esos sucesos lleguen a ocurrir realmente. Nos dice: «Éstas son las probabilidades de que esto o aquello llegue a suceder.»

Antes de que se produzca la interferencia en el desarrollo en aislamiento de un sistema observado, éste continúa desarrollando, sin trabas, sus posibilidades de acuerdo con la ecuación de onda de Schrödinger. Sin embargo, tan pronto como realizamos la medida — es decir, tratamos de ver lo que ocurre — la probabilidad de todas las posibilidades excepto una se convierte en cero y la probabilidad de esa única posibilidad se convierte en *uno,* lo que significa que está ocurriendo.

El desarrollo de la función de onda (posibilidades) sigue un determinismo invariable. Calculamos su desarrollo utilizando la ecuación de onda de Schrödinger. Dado que la función de probabilidad está basada en la función de onda, las probabilidades de sucesos posibles se desarrollan, también, de manera determinista y según la ecuación de onda de Schrödinger.

Ésta es la razón por la cual podemos predecir con certeza la probabilidad de un suceso pero no el suceso en sí. Calculamos la probabilidad de un resultado deseado, pero cuando realizamos la medida puede que sea ése el resultado obtenido o puede que no. El fotón puede incidir en la región B, pero también es posible que incida en la región A. Cuál de estas dos posibilidades se convierte en realidad es, según la teoría del quanto, cuestión de azar.

Regresemos al experimento con la pantalla de doble rendija. En este experimento no podemos predecir dónde incidirá un fotón. Sin embargo podemos calcular dónde hay mayor posibilidad de que incida ahora, dónde incidirá después y así sucesivamente.* Así es cómo ocurren las cosas.

Supongamos que colocamos un detector de fotones en una de las rendijas y otro detector de fotones en la otra. Empezamos emitiendo fotones desde la fuente de luz. Más pronto o más tarde uno u otro pasará por uno u otro de los orificios. Para ese fotón existen dos posibilidades. Pasará por el orificio número uno y el detector número uno se disparará marcando su paso; o pasará por el orificio dos y el que se disparará será el detector número dos. Cada una de esas dos posibilidades se incluye en la función on-

* Lo que podemos predecir es la probabilidad correspondiente a determinadas especificaciones que puede ser inserta en la función de densidad. Hablando con exactitud, no calculamos las probabilidades en determinados puntos, sino más bien las probabilidades de transición entre dos estados (preparación inicial y percepción final) cada uno de los cuales está representado por una función continua de x y p (posición y momento).

dulatoria de ese fotón.

Supongamos que cuando contemplamos los dos disparadores vemos que el que se ha accionado ha sido el número dos. Tan pronto como hayamos comprobado que es así tendremos la seguridad de que ese fotón no ha pasado por el número uno. Esa posibilidad no existe, la función de onda del fotón ha cambiado.

La representación gráfica (gráfico) de la función de onda del fotón, antes de que hagamos la medida, tiene dos curvas, cada una de las cuales representa la posibilidad de que el fotón pase por el orificio uno y dispare el detector número uno o de que pase por el orificio dos y dispare el detector número dos.

Una vez detectado el paso del fotón por el orificio dos, la posibilidad de que pase por el orificio número uno deja de existir. Cuando esto ocurre la curva en el gráfico de la función de onda, que indicaba esa posibilidad, se transforma en una línea recta. Este fenómeno es llamado el «colapso de la función de onda».

Los físicos dicen que la función de onda presenta dos distintos modos de evolución. El primero es un desarrollo suave y dinámico, que puede ser previsto de acuerdo con la ecuación de onda de Schrödinger. El segundo es abrupto y discontinuo (otra vez esta palabra). La característica de ese último modo de desarrollo es el colapso de la función de onda. Cuál de las dos partes de la función ondulatoria entra en colapso es pura casualidad. La transición del primer modo al segundo es lo que se llama un salto cuántico.

El Salto del Quanto no es una danza. Es el colapso abrupto de todos los aspectos desarrollados en la función de onda, excepto del que se realiza. La representación matemática del sistema observado pasa, literalmente, de una situación a otra, sin ninguna transición entre las dos.

En un experimento con la mecánica cuántica, el sistema observado al trasladarse sin ser molestado entre la región de preparación y la región de medida se desarrolla de acuerdo con la ecuación de onda de Schrödinger. Durante ese tiempo todas las cosas que podrían ocurrir se desarrollan de acuerdo con el propio desarrollo de la función de onda. Sin embargo, tan pronto como interfiere con el instrumento de medida (el sistema de observación) una de esas posibilidades se realiza y el resto deja de existir. El salto del quanto se transforma así de una potencialidad multifacética en una única realización.

En términos generales, el salto del quanto es también un salto de una realidad que posee en teoría un número infinito de dimensiones, a una realidad que sólo tiene tres.* Esto sucede porque la función de onda del

* Los grados de libertad no siempre se derrumban de esa manera. Si el experimento tuviera como objetivo especial la determinación de la posición de cada una de las partículas, en ese caso la reducción alcanzaría al espacio clásico de los grados de libertad. Sin embargo, también es posible realizar otro tipo de medidas. En realidad por lo general no determinamos las posiciones exactas de las partículas, sino más bien una especie de media ponderada sobre el espacio (p, x).

sistema observado, antes de ser sometido a observación prolifera en múltiples dimensiones matemáticas.

Por ejemplo, consideramos la función de onda de nuestro fotón en el experimento de la doble rendija. Contiene en sí dos posibilidades. La primera posibilidad es que el fotón pase por el orificio uno y su paso sea señalado por el detector número uno; la segunda posibilidad es que el fotón pase por el orificio número dos y sea el detector número dos el que actúe. Cada una de esas posibilidades, por sí sola, estará representada por una función de onda que tiene tres dimensiones, longitud, anchura y profundidad, además de tiempo.

Si queremos describir un suceso físico con exactitud, tenemos que decir dónde sucede y cuándo.

Para describir dónde ocurre algo se precisan tres coordenadas. Supongamos que quiero dar instrucciones para localizar a un globo invisible que flota en una habitación vacía. Puedo decir, por ejemplo: «A partir de un rincón determinado, deslícese metro y medio a lo largo de una pared determinada (una dimensión), sepárese un metro en vertical de la pared (segunda dimensión) y elévese setenta centímetros del suelo (tercera dimensión).» El globo quedará determinado en su posición. Toda posibilidad existe en tres dimensiones y tiene un tiempo.

Si en una función ondulatoria hay dos posibilidades, entonces la función ondulatoria tiene seis dimensiones, tres para cada posibilidad. Si hay doce posibilidades en una función de onda, ¡en ese caso la función de onda existe en treinta y seis dimensiones!

Es imposible visualizar una cosa así puesto que nuestra experiencia está limitada a tres dimensiones. Pero ésta es la definición matemática de la situación.

Debemos reflexionar sobre el hecho de que, cuando tomamos una medida en un experimento relacionado con la física cuántica — cuando el sistema observado sufre la interacción con el sistema de observación —, lo que hacemos es reducir una realidad multidimensional a una realidad tridimensional compatible con nuestra experiencia.

Si calculamos una función de onda para un posible fotón en cuatro diferentes puntos, en ese caso la función de onda existe simultáneamente en doce dimensiones. En principio podemos calcular una función de onda representativa de un número infinito de sucesos que ocurren al mismo tiempo en un número infinito de dimensiones. Pero, independientemente de lo compleja que sea la función de onda, tan pronto como realicemos la medida queda reducida a un suceso en tres dimensiones que es la única forma en que la realidad, instante a instante, puede ser observada normalmente por nosotros.

Ahora llegamos a la cuestión de: «¿Cuándo, exactamente, se produce el colapso de la función?» ¿Cuándo se desvanecen todas esas posibilidades, excepto una, que se han desarrollado en el sistema observado?

Hasta este momento hemos dicho que el colapso se produce cuando

alguien mira al sistema observado. Éste es sólo un punto de vista. Otra opinión (toda discusión sobre este asunto es siempre pura opinión) es que la función de onda cae en colapso cuando *Yo* miro al sistema observado. También hay otra opinión, según la cual una función de onda se derrumba cuando se lleva a cabo cualquier medida, incluso mediante un instrumento. Según este punto de vista no tiene importancia el que nosotros estemos allí para contemplarlo o no.

Supongamos por un momento que no haya ningún experimentador humano interviniendo en el experimento. Se realiza de modo completamente automático. Una fuente de luz emite un fotón. La función de onda del fotón contiene la posibilidad de que el fotón pase por la abertura número uno y el detector número uno se dispare, y también la posibilidad de que pase por el orificio número dos y, por consiguiente, sea el detector número dos el que marque su paso.

Ahora supongamos que el detector número dos registra un fotón.

De acuerdo con la física clásica, la fuente de luz emite una partícula auténtica, real, un fotón, que se traslada desde la fuente de luz hasta la rendija donde está el detector número dos que lo registra. Aun cuando no conocemos su posición mientras se está trasladando, podríamos haberla determinado de saber el modo de hacerlo.

De acuerdo con la mecánica cuántica no es así. No hay ninguna partícula auténtica llamada fotón que se traslade desde la fuente de luz hasta la pantalla. No existía el fotón hasta que no se actualizó la rendija número dos. Hasta ese momento sólo existió una función de onda. En otras palabras, hasta ese momento todo lo que existió fueron tendencias para que un fotón se realizara bien en la rendija número uno o en la rendija dos.

Desde el punto de vista clásico un fotón real viaja entre la fuente de luz y la pantalla. La probabilidad de que pase por la rendija número dos es del 50 por ciento. Desde el punto de vista de la física cuántica no existe el fotón hasta el momento en que el detector se dispara. Lo único que existe es una potencialidad de desarrollo en la cual un fotón va a la rendija uno *y* a la rendija dos. Ésa es «una extraña forma de realidad física que se halla exactamente en el centro entre la posibilidad y la realidad»,[5] según Heisenberg.

Es muy difícil hacer que esto suene de manera menos vaga. La traducción de las matemáticas al castellano, como a cualquier otro idioma, implica una falta de precisión, pero éste no es el problema. Podemos experimentar una imagen más claramente definida de este fenómeno aprendiendo las matemáticas suficientes para seguir el desarrollo de la ecuación de onda de Schrödinger. Desgraciadamente clarificar esa imagen sólo significaría confundir aún más la mente.

El problema auténtico estriba en que estamos acostumbrados a mirar al mundo de manera simple. Aceptamos, corrientemente, la idea de que algo existe o no existe, está aquí o no está. Tanto si miramos a ese objeto como si no, está o no está. Nuestra experiencia nos dice que nuestro mun-

do físico es sólido, auténtico e independiente. La mecánica cuántica nos dice, sencillamente, que eso no es así.

Supongamos que un técnico, que no sabe que estamos realizando el experimento de manera automática, entra en la habitación para ver cuál ha sido el detector que registró el paso de un fotón. Cuando mira al sistema observador (los detectores) puede ver dos cosas. La primera posibilidad es que sea el detector número uno el que registró el fotón; la segunda, que lo sea el detector número dos. La función de onda del sistema de observación (ahora este sistema es el «técnico») tiene dos máximos, uno para cada posibilidad.

Hasta que el técnico comprobó los dos detectores — hablando desde el punto de vista de la mecánica cuántica — en cierto modo se daban ambas situaciones. Tan pronto como ve que el detector número dos se ha disparado, es decir, registró el paso del fotón, desaparece la posibilidad de que el detector número uno haya entrado en acción. Ese componente de la función de onda del sistema de medición desaparece y la realidad para el técnico es que el detector número dos ha registrado un fotón. En otras palabras, el sistema de observación en el experimento — los detectores — se ha convertido en el sistema observado en relación con el técnico.

Sigamos suponiendo que el físico supervisor entra en la habitación para comprobar la actividad del técnico. Quiere enterarse de lo que el técnico ha descubierto en los detectores. A este respecto hay dos posibilidades: una es que el técnico haya visto que el detector número uno registró el fotón y la otra que el técnico haya visto que el detector número dos registró el fotón, y así sucesivamente.*

La división de la función de onda en dos curvas, cada una de ellas representativa de una posibilidad, ha ido progresando al pasar del fotón a los detectores, de éstos al técnico y del técnico al supervisor. Esta proliferación de posibilidades es el tipo de desarrollo regido por la ecuación de onda de Schrödinger.

Sin percepción, de acuerdo con la ecuación de onda de Schrödinger, el universo continúa generando una infinita profusión de posibilidades. El efecto de la percepción es, sin embargo, inmediato y dramático. Todos los componentes de la función de onda que representa al sistema observado desaparecen, menos uno que se convierte en realidad. Nadie sabe las razones para que una de las posibilidades se realice y el resto se desvanezca. La única ley que gobierna a ese fenómeno es estadística. En otras palabras, la elección depende de la suerte, de la casualidad.

La división en dos partes de la función de onda del fotón, de la de los

* Para darse cuenta de lo conciso de la expresión matemática, considérese que todo el proceso descrito en la Teoría de la Medida que va desde el fotón (sistema, S) a los detectores (instrumentos de medición, M), al técnico (observador, O), puede ser representado en una sola «frase»:

$$(\Psi_s^1 + \Psi_s^2) \otimes \Psi_M \otimes \Psi_0 \rightarrow \Sigma(\Psi_s^1 \otimes \Psi_M^1 \otimes \Psi_0^1) + \Sigma(\Psi_s^2 \otimes \Psi_M^2 \otimes \Psi_0^2)$$

detectores, del técnico, del supervisor, etc., se conoce como el «Problema de la Medida» (o en otras ocasiones «Teoría de la Medida».* Si hubiera veinticinco posibilidades en la función de onda del fotón, en la función de onda del sistema de medida, del técnico o del supervisor existirían veinticinco desigualdades o curvas separadas hasta el momento en que la función ondulatoria se colapsase. Desde el fotón a los detectores, al técnico, al supervisor, podríamos continuar hasta incluir al universo. Pero una vez incluido todo el universo, *¿quién miraría al universo?* Dicho de otro modo: *¿Cómo adquiere realidad el universo?*

La respuesta llega cerrando el círculo: *Nosotros* mismos damos realidad, hacemos que se realice el universo. Puesto que nosotros formamos parte del Universo esto nos convierte, a nosotros y al universo, en autorealizantes.

Esta forma de pensamiento es similar, en varios aspectos, a la sicología budista. Además, podría convertirse en una de las muchas contribuciones de importancia de la física a la creación de modelos de consciencia futuros.

La Interpretación de Copenhague de la Mecánica cuántica nos dice que resulta innecesario «atisbar entre bastidores para ver lo que está sucediendo realmente», en tanto que la mecánica cuántica esté actuando (correlacionando la experiencia correctamente). No es necesario saber cómo es posible que la luz se manifieste en corpúsculos y ondas. Basta con saber que lo hace y con estar en condiciones de usar el fenómeno para predecir probabilidades. En otras palabras, las características ondulatoria y corpuscular de la luz se unifican mediante la mecánica cuántica. Pero a un precio: la falta de descripción de la realidad.

Todos los intentos de describir la «realidad» quedan relegados a la categoría de especulación metafísica.* Sin embargo, esto no quiere decir que los físicos no especulen. Muchos de entre ellos acostumbran a hacerlo, en particular Henry Stapp, y su razonamiento es más o menos éste:

En la mecánica cuántica, la cantidad teórica fundamental es la función de onda. La función de onda es (cambia a medida que progresa el tiempo) una descripción dinámica de posibles hechos susceptibles de ocurrir. Pero, ¿qué describe realmente la función de onda? De acuerdo con el pensamiento occidental, el mundo tiene solamente dos aspectos esenciales, uno de los cuales es materialista y otro idealista.

El aspecto materialista está asociado con el mundo externo, la mayor parte del cual se concibe como constituido por materia inanimada que es dura y no responde a los impulsos, como las rocas, el suelo, el metal, etc. El aspecto idealista es el de nuestra experiencia subjetiva. El reconciliar

* La Teoría de la Medida, como aquí la exponemos, es esencialmente la ofrecida por John von Neumann en 1935.

* La función de onda es la descripción que hacen los físicos de la realidad. Son motivo de controversia tanto la interpretación de la función de onda como si esta es la mejor de las descripciones posibles. (O, simplemente, la única que se adapta al lenguaje utilizado por los físicos.)

esos dos aspectos ha venido siendo un tema central de la religión, a lo largo y lo ancho de la historia. Las filosofías que representan principalmente esos aspectos son el Materialismo (el mundo es igual a la materia, independientemente de nuestras impresiones), y el Idealismo (la realidad es como las ideas, independientemente de las apariencias). La cuestión es, ¿cuál de estos dos aspectos representa la función de onda?

La respuesta, de acuerdo con el punto de vista pragmático de la mecánica cuántica desarrollado por Stapp, es que la función de onda representa algo que participa de ambas características, la idealista y la materialista.*

Por ejemplo, cundo el sistema observado tal y como está representado en la función de onda se propaga en aislamiento entre la región de preparación y la región de medida, se desarrolla de acuerdo con una ley estrictamente determinista (la ecuación de onda de Schrödinger). El desarrollo temporal de acuerdo con una ley causal es una características de la materia. Por consiguiente, lo que la función de onda representa, sea lo que sea, parece materia.

Sin embargo, cuando el sistema observado, tal y como está representado por la función de onda, sufre interacción con el sistema observador (cuando tomamos una medida), salta de repente a un nuevo estado. Este tipo de transiciones del «Salto del Quanto» tiene características propias del idealismo. Las ideas (como por ejemplo nuestro conocimiento sobre algo) pueden cambiar de manera discontinua (y lo hacen). Por consiguiente, sea lo que sea lo que la función de onda represente, ese algo tiene un aspecto idealista.

La función de onda, hablando en un sentido estricto, representa a un sistema observado en un experimento mecánico cuántico. En términos generales describe una realidad física al nivel más fundamental (el subatómico) que los físicos han estado en condiciones de poder probar. Realmente, de acuerdo con la mecánica cuántica, la función de onda es una descripción *completa* de la realidad física a ese nivel. La mayor parte de los especialistas en física creen que no es posible una descripción de la subestructura que subraye la experiencia de manera más completa que lo hace la función de onda.

* La función de onda, puesto que es un instrumento para nuestro entendimiento de la naturaleza, es algo en nuestras ideas. Representa ciertas *especificaciones* de ciertos sistemas físicos. Las especificaciones son objetivas en el sentido de que científicos y técnicos pueden estar de acuerdo sobre ellas. Pero estas especificaciones no existen fuera del pensamiento. Consecuentemente cualquier sistema físico dado satisface a muchas series de especificaciones. Todas esas características son idealistas y, en este aspecto, dado que están representadas por la función de onda, ésta es idealista, pese incluso a ser objetiva.

Sin embargo, estas especificaciones son transcritas en funciones de onda que se desarrollan de acuerdo con una determinada ley (la ecuación de onda de Schrödinger). Éste es un aspecto materialista. Lo que se está desarrollando sólo describe probabilidades. Las probabilidades pueden describir cosas que existen aparte de los pensamientos o cosas que existen sólo conjuntamente con las ideas. Por eso la función de onda representa algo que tiene al mismo tiempo características idealistas y materialistas.

—¡Espera un momento! — dice Jim de Wit (¿de dónde habrá salido?) —. La descripción contenida en la función de onda está compuesta de coordenadas (tres, seis, nueve, etc.) y de tiempo (véase pág. 90). ¿Cómo podría ser una descripción completa de la realidad? Imagínate cómo me sentiría si mi novia se me fugara con otro. ¿Cómo puede explicarse *eso* en una función de onda?

No puede hacerse. La «descripción completa» que proclama la teoría del quanto para la función de onda es una descripción de la realidad *física.* No importa lo que pensemos o sintamos sobre ella o lo que veamos en ella, la función de onda describe de la manera más completa posible dónde y cuándo estamos haciendo algo.

Dado que la función de onda está pensada como una descripción completa de la realidad física y puesto que, con ello, la función de onda describe la realidad física al mismo tiempo como materialista e idealista, ésta debe ser ambas cosas. En otras palabras, el mundo no puede ser como aparece. Por increíble que esto parezca ésta es la conclusión a que se llega desde el punto de vista pragmático de la mecánica cuántica. El mundo físico aparece como si fuera completamente substativo (hecho de «materia»). Pero como, por otra parte, parece tener un aspecto idealista, el mundo físico no es substantivo en el sentido usual que se da a esa palabra (es decir, cien por cien materia y cero por cien idea). Así lo explica Stapp:

> Si la posición de la mecánica cuántica es correcta, en el amplio sentido de que no puede existir una descripción de la subestructura que subraye la experiencia de mejor manera que la ofrecida por ella, entonces no existe un mundo físico substantivo en el sentido usual que se da a ese término. La conclusión que aquí se obtiene no es la débil conclusión de que *es posible* que no haya un mundo físico substantivo, sino más bien la de que, definitivamente, no existe un mundo físico sustantivo.[6]

Eso no significa que el mundo sea completamente idealista. La Interpretación de Copenhague de la Mecánica cuántica no va tan lejos como para decir lo que es la realidad «realmente igual que tras bastidores», pero sí dice que no es como aparece. Dice que lo que percibimos como una realidad física de hecho nuestra construcción cognoscitiva de él. Esta construcción cognoscitiva puede parecer como si fuera sustantiva, pero la Interpretación de Copenhague de la Mecánica cuántica conduce directamente a la conclusión de que el mundo físico no es en sí mismo.

Esta declaración parece, en principio, tan absurda y alejada de la experiencia que nuestra inclinación es rechazarla como el loco producto de intelectuales enclaustrados. Sin embargo, hay varias buenas razones para no ser tan apresurados en nuestro juicio. La primera de esas razones es que la física cuántica es un sistema lógicamente consistente. Es autoconsistente, es decir, consistente consigo mismo, y al mismo tiempo, consistente con todos los experimentos conocidos.

Segundo, la prueba experimental en sí misma es incompatible con nuestras ideas ordinarias con respecto a la realidad.

Tercero, los físicos no son las únicas personas que ven el mundo así. Sólo son los miembros más nuevos de un grupo bastante numeroso. La mayor parte de los hindúes y budistas mantienen puntos de vista similares.

Es evidente, pues, que incluso los físicos que rechazan la metafísica tienen dificultades para evitarla. Ahora llegamos a esos físicos que se han lanzado con los pies por delante en la descripción de la «realidad».

Hasta ahora nuestro discurso se ha basado en la Interpretación de Copenhague de la Mecánica cuántica. El inconveniente inevitable en esta interpretación es el Problema de la Medida. Todo tipo de percepción, por medio de un sistema de observación, provoca el colapso de la función de onda del sistema observado y su paso a una realidad física; de otro modo el «sistema observado» no existe físicamente sino como un número de posibilidades, generadas de acuerdo con la ecuación de onda de Schrödinger, que prolifera sin límites.

La teoría propuesta por Hugh Everett, John Wheeler y Neill Graham resuelve el problema del modo más sencillo posible.[7] Proclama que la función de onda es una cosa real, todas las posibilidades que representa son reales *y todas ellas suceden.* La interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica es que sólo una de las posibilidades contenidas en la ecuación de onda de un sistema observado llega a realizarse y que el resto de ellas se desvanecen. ¡La teoría de Everett-Wheeler-Graham dice que todas ellas se realizan, pero en diferentes mundos que coexisten con el nuestro. ¿Quién está en esos mundos? *Nosotros lo estamos.*

Volvamos una vez más al experimento de las dos rendijas. Una fuente de luz emite un fotón. El fotón puede pasar por la rendija uno o por la rendija dos. Ahora añadamos un nuevo procedimiento experimental. Si el fotón pasa por la rendija número uno yo corro escaleras arriba. Si el fotón pasa por la rendija dos, yo corro escaleras abajo. Por consiguiente, una posible ocurrencia es que ese fotón pase por la rendija uno, se dispare el detector uno y yo suba las escaleras. La segunda posible ocurrencia es que el fotón pase por la rendija dos, se dispare el detector número dos y yo corra escaleras abajo.

De acuerdo con la Interpretación de Copenhague esas dos posibilidades se excluyen mutuamente porque no es posible que yo suba y baje las escaleras al mismo tiempo. Esto nos conduce, sin duda, a la más fantástica de las implicaciones de la física cuántica: la forma final de nuestra realidad experimental está afectada por la interferencia de posibilidades que se excluyen mutuamente. Cuando la función de onda que representa esas posibilidades se desarrolla de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, esas posibilidades mutuamente excluyentes interfieren entre sí.

Del mismo modo que las crestas y los senos de las ondas de la luz de cada una de las rendijas, en el experimento de la doble rendija, se refuerzan unas a otras en determinados lugares y se anulan en otros, las posibi-

lidades mutuamente excluyentes interfieren unas con otras a nivel de la realidad del quanto para determinar la forma y el contorno de la realidad que experimentamos.

De acuerdo con la teoría de Everett-Wheeler-Graham, en el momento en que la ecuación de onda «colapsa», el universo se divide en dos mundos. En uno de ellos yo subo escaleras arriba y en el otro corro escaleras abajo. Existen dos distintas ediciones de mí. Cada una de ellas hace cosas distintas y cada una de ellas ignora a la otra. Sus (nuestras) sendas jamás se cruzarán puesto que los dos mundos en que se dividió el original son, para siempre, ramas separadas de la realidad. En cada medición (cada vez que una cosa ocurre en vez de otra) el universo se divide en un número de mundos diferentes, uno para cada posibilidad. Cada uno de esos mundos tiene asignado un «peso» distinto, que se corresponde a la probabilidad calculada para él por la función de onda. Todos esos mundos son idénticos, excepto en el suceso que causó la división y sus consecuencias. A la teoría de Everett-Wheeler-Graham se la llama, apropiadamente, la Interpretación de los Múltiples Mundos de la Mecánica cuántica.

La fórmula matemática de la Interpretación de los Múltiples Mundos de la Mecánica cuántica es extraordinariamente estética. Su interpretación en castellano suena como si fuera poesía mística.

El observador es definido como un modo de dividir al universo, que en su totalidad es *uno,* en un observador y un observado. (El «observador» no tiene por qué ser un ente consciente. *Toda* percepción, incluso una realizada por un instrumento mecánico, divide al mundo en distintas ramas).* Para cada observador hay un «estado relativo» que es el «observado».

En otras palabras «Yo» vengo del universo y cuando «Yo» miro al mundo lo que «Yo» veo es el resto del universo tal y como se reagrupó a sí mismo para aparecer ante «Mí». Se trata de un estado relativo particular para este particular «Yo». Ese estado particular corresponde a «Mi» rama del universo. Cada vez que se realiza una observación, el universo se rompe en distintas ramas. Ésta es otra manera de decir que cada vez que se hace una observación el universo se contempla a sí mismo a través de uno de los «Yo's» de reciente formación. Naturalmente, ese «Yo» es el único que ve al universo de esa particular manera. «El Observador» es una forma especial de descomponer la función de onda.

De ese modo el Problema de la Medición deja de ser un problema. El problema de la medición era en último lugar «¿Quién está contemplando el universo?» La Teoría de los Múltiples Mundos dice que no es necesario que se produzca el colapso de una función de onda para que el universo se realice. Todas las posibilidades mutuamente excluyentes que se contenían en la función de onda de un sistema observado que (de acuerdo con la

* La descomposición de la función de onda, en diversas ramas, se realiza independientemente de que estén presentes o no, físicamente, «observadores» en el sentido usual de esta palabra.

Interpretación de Copenhague) no «se realizaban» cuando se producía el colapso de la función de onda, *se realizaban* realmente, pero no en esta rama del universo. Por ejemplo, una de las posibilidades contenidas en la función de onda se realizaba en esta rama del universo (subo las escaleras). La otra posibilidad, contenida igualmente en la función de onda (bajo las escaleras), se realiza también, pero en una rama distinta de la realidad. En *esta* rama de la actualidad yo subo las escaleras. En otra rama de la realidad yo bajo las escaleras. Ninguno de los dos «yo» tiene conocimiento del otro «yo». Ambos «yo» creen que su rama del universo es la realidad completa.

La teoría de los Mundos Múltiples dice que existe un universo y su función de onda representa todas las formas en cómo puede autodescomponerse en un «observador» y un «observado». Aquí nos encontramos todos encerrados en un gran cajón y no es preciso mirar al cajón desde el exterior para hacerlo realidad.

En este aspecto la teoría de los Mundos Múltiples es especialmente interesante porque la teoría de la relatividad general de Einstein nos demuestra que nuestro universo podría *ser* un gran cajón cerrado y, si es así, resulta de todo punto imposible el salir de él.*

«El Gato de Schrödinger» resume las diferencias entre la física clásica, la Interpretación de Copenhague de la Mecáinca cuántica y la Interpretación de los Mundos Múltiples de la Mecánica cuántica. El «Gato de Schrödinger» es un dilema presentado por el famoso descubridor de la ecuación de onda que lleva su nombre:

Se mete a un gato dentro de un cajón. En el interior de la caja hay un aparato que puede dejar escapar un gas que mata instantáneamente al gato. Un suceso casual (la desintegración radiactiva de un átomo) determina si el gas es emitido o no. No hay otra forma de saber si el gas ha sido emitido o no, salvo mirar dentro del cajón. La caja es sellada y el experimento da comienzo. Un momento después, el gas ha sido emitido o no. La pregunta no tiene respuesta sin mirar lo que ha ocurrido en el interior de la caja. (Esto nos recuerda el reloj imposible de abrir de Einstein.)

De acuerdo con la física clásica, el gato está muerto o no lo está. Todo lo que tenemos que hacer es abrir el cajón y ver cuál es el caso. De acuerdo con la mecánica cuántica la solución no es tan simple.

La Interpretación de Copenhague de la Mecánica cuántica dice que el gato está en una especie de limbo representado por una función de onda que contiene la posibilidad de que el gato esté muerto y, también, la posi-

* «¿Cómo puede aplicarse la definición convencional de la mecánica cuántica a la geometría del espacio-tiempo? La solución resulta muy difícil en el caso de un universo cerrado. No hay lugar donde situarse, fuera del sistema, para poder observarlo», Hugh Everett III (*Reviews of Modern Physics*, 29-3-1957, 455)

bilidad de que el gato siga vivo.* Cuando abrimos el cajón y no antes, una de las dos posibilidades se realiza y la otra desaparece. Esto es lo que se conoce como el colapso de la función de onda porque el máximo en la función de onda que representa la posibilidad de que esto no ocurra se desvanece. Es necesario mirar en el interior de la caja antes de que una de esas posibilidades pueda ocurrir. Hasta entonces no es más que una función de onda.

Desde luego eso no tiene sentido. La experiencia nos dice que lo que metemos en el cajón es un gato y un gato es lo que continúa estando dentro del cajón y no una función de onda. La única cuestión es si el gato es un gato vivo o un gato muerto. Pero lo cierto es que dentro del cajón hay un gato, tanto si miramos dentro o no. Esto no conlleva diferencia alguna en lo que al gato se refiere. Su destino estaba decidido al comienzo del experimento.

El punto de vista del sentido común es el punto de vista de la física clásica. De acuerdo con la física clásica podremos llegar a saber algo mediante la observación. De acuerdo con la mecánica cuántica el suceso no se produce hasta que lo observamos. Por consiguiente, el destino del gato no queda determinado hasta que miramos en el interior de la caja.

La Interpretación de los Mundos Múltiples de la Mecánica cuántica y la Interpretación de Copenhague de la Mecánica cuántica coinciden en que el destino del gato no queda determinado hasta que miramos en el interior del cajón. Lo que ocurre después de que hemos mirado en el interior del cajón dependerá de la interpretación que decidamos seguir. De acuerdo con la Interpretación de Copenhague en el instante en que miramos en el interior del cajón una de las posibilidades contenidas en la función de onda se realiza y la otra se desvanece. El gato quedará, pues, vivo o muerto.

De acuerdo con la Interpretación de los Mundos Múltiples, en el instante en que nosotros miramos en el interior del cajón, el mundo se divide, se rompe, en dos ramas, cada una de las cuales con una distinta «edición» del gato. La función de onda que representa el gato no se derrumba. El gato está al mismo tiempo vivo *y* muerto. En una rama del mundo el gato está muerto y eso es lo que nosotros vemos. En otra rama del mundo el gato está vivo y eso es lo que nosotros vemos.

En ambas ramas del mundo son distintas ediciones de nosotros los que realizan la contemplación.**

* En la práctica no queda claro que un objeto macroscópico, como un gato, pueda ser representado por una función de onda debido a la influencia dominante de procesos termodinámicamente irreversibles. Pero aún así, el gato de Schrödinger ilustra a los estudiantes de física los aspectos sicodélicos de la física cuántica.

** Hablando con mayor precisión, de acuerdo con la Interpretación de los Mundos Múltiples, el mundo se divide *inmediatamente* en dos ramas, una con un gato muerto, otra con un gato vivo. Eso implica que, en cierto sentido, el gato está vivo y muerto. Estas dos ramas tienen al «observador» representado por una misma función de onda. Cuando el observador abre la caja y mira dentro, su función de onda será afectada: se dividirá en dos partes, una asociada con un gato

En resumen, la física clásica dice que aquí hay un mundo, tal y como aparece, y es así. La física cuántica ofrece la posibilidad de que esto no sea así. La Interpretación de Copenhague de la Mecánica cuántica elude una descripción de lo que sea el mundo «realmente», pero llega a la conclusión de que sea como sea no es sustantivo (compuesto de sustancia) en el sentido usual de la expresión. La Interpretación de los Mundos Múltiples de la Mecánica cuántica nos dice que vivimos simultáneamente en varios mundos, un número incontable de ellos y todos ellos son reales. Hay, incluso, otras interpretaciones de la mecánica cuántica, pero todas ellas son fantásticas en algún sentido.

La física cuántica es más misteriosa que la ciencia-ficción.

La mecánica cuántica es una teoría y un procedimiento que se ocupa de fenómenos subatómicos. En general, estos fenómenos subatómicos son inaccesibles para todos, con excepción de aquellos que tienen acceso a un instrumental muy complicado (y muy caro). Pero incluso con ese instrumental más caro y perfecto sólo podemos ver los efectos de los fenómenos subatómicos. El mundo de lo subatómico está más allá de los límites de la percepción sensorial.* Está más allá de los límites del entendimiento racional. Naturalmente tenemos teorías racionales sobre él, pero lo «racional» se ha ampliado hasta incluir algo que anteriormente era «insensatez» o, cuando menos, paradójico.

El mundo en que vivimos, el mundo de las autopistas y las bañeras y de las demás personas, parece alejado al máximo de las funciones de onda y las interferencias. En resumen, la metafísica de la mecánica cuántica está basada en un salto desprovisto de sustancia desde lo microscópico a lo macroscópico. ¿Podemos aplicar esas implicaciones de la investigación subatómica al mundo en su totalidad?

No. No, si tenemos que facilitar una prueba matemática en cada instancia. Pero, ¿qué es una prueba? Una prueba, sólo prueba que estamos jugando con las reglas. (Y somos nosotros, además, los que hacemos las reglas.) Las reglas, en este caso son aquellas que nosotros proponemos sobre la naturaleza de la realidad física: (1) ser lógicamente consistentes y, (2) que se correspondan con la experiencia. No hay nada en la regla que diga que lo que proponemos tenga que ser algo semejante a la «realidad». La física es una explicación autoconsistente de la experiencia. Precisamente en orden a la satisfacción de los requerimientos de autoconsistencia de la física se hacen importantes estas pruebas.

El Nuevo Testamento presenta un diferente punto de vista. Cristo después de su resurrección probó a Tomás (que se hizo proverbial por sus dudas) que Él era realmente Él, resucitado de entre los muertos, mostrán-

---

vivo y otra con un gato muerto, pero cada uno de los dos observadores verán a un gato distinto, uno muerto y otro vivo.

* El ojo adaptado a la oscuridad puede detectar simples fotones. Todas las demás partículas subatómicas tienen que ser detectadas indirectamente.

dole sus heridas. Al mismo tiempo Cristo concedía su especial favor a aquellos que creyeron en Él *sin pruebas.*

La aceptación sin pruebas es la característica fundamental de la religión occidental. El rechazo cuando no hay pruebas es la característica fundamental de la ciencia occidental. En otras palabras, la religión se ha convertido en asunto de corazón y la ciencia en asunto de la mente. Este lamentable estado de cosas no refleja el hecho de que, fisiológicamente, una cosa no puede existir sin la otra. Todo el mundo necesita de ambos. La mente y el corazón son, únicamente, diferentes aspectos de *nosotros.*

¿Quién tiene razón? Los discípulos, ¿deben creer sin necesidad de pruebas? ¿Deben insistir los científicos en su necesidad? ¿Carece el mundo de sustancia? Es real pero se va dividiendo y dividiendo en innumerables ramas?

Los Maestros de Wu Li saben que «ciencia» y «religión» son únicamente danzas y que aquellos que las siguen son danzarines. Los danzarines pueden proclamar que siguen la «verdad» o proclamar que buscan la «realidad», pero los Maestros de Wu Li están mejor enterados. Saben que el auténtico amor de todos los danzarines es la danza.

MI SENDA

EL PAPEL DEL «YO»

Antes de que Copérnico descubriera que la Tierra giraba en torno al Sol, la creencia general era de que el Sol con todo el universo giraban en torno a la Tierra, que era el centro fijo de todo. En una época todavía anterior, en la India, se cedió al hombre esta posición geocéntrica. Con esto, hablando sicológicamente, cada persona era reconocida como centro del universo. Aunque esto parezca una postura egoísta no lo es puesto que *toda* persona era reconocida como una manifestación de la divinidad.

Hay una bella pintura hindú que nos muestra a Krishna danzando a la luz de la luna en las orillas del Yamuna. Se mueve en el centro de un círculo de rubias mujeres Vrayas. Están enamoradas de Krishna y danzan con él. Krishna está bailando con todas las almas del mundo... el hombre danza consigo mismo. Danzar con Dios, el creador de todas las cosas, es danzar con nosotros mismos. Éste es un tema que se repite en la literatura oriental.

Ésta es también la dirección a la cual parece dirigirse la nueva física, la mecánica cuántica y la relatividad. Partiendo de los conceptos revolucionarios de la relatividad y de las paradojas (que desafían a la lógica) de la mecánica cuántica, surge un antiguo paradigma. En una nueva forma vaga comenzamos a divisar un marco conceptual dentro del cual uno de nosotros comparte la paternidad en la creación de la realidad física. Se está disolviendo, difuminando, nuestra antigua imagen de espectador impotente, que ve pero que no actúa.

Estamos contemplando, quizá, el mayor compromiso de nuestra historia. Entre el potente ronquido de los aceleradores de partículas, el cric de las impresiones de los computadores y el baile de los más sofisticados instrumentos de la civilización, la vieja «ciencia» que tanto nos ha dado, incluso nuestro sentido de impotencia ante las fuerzas sin rostro de lo grandioso, está minando sus propios fundamentos.

Con la pavorosa autoridad que nosotros mismos le hemos dado, la ciencia nos dice que pusimos nuestra fe en algo erróneo. Se tiene la impresión de que todos nosotros hemos intentado lo imposible: renegar de nuestra participación en el universo. Y hemos querido hacerlo traspasando nuestra autoridad a los Científicos. A los Científicos les dimos la responsabilidad

de demostrar los misterios de la creación, de los cambios y de la muerte. Para nosotros reservamos la rutina cotidiana de una vida sin cerebro.

Los Científicos aceptaron su tarea. Nosotros la nuestra que consistía en representar un papel de impotencia frente a la siempre creciente complejidad de la «ciencia moderna» y la cada vez mayor extensión de la moderna tecnología.

Ahora, al cabo de tres siglos, los Científicos regresan con sus descubrimientos. Y se sienten tan asombrados y perplejos (aquellos de entre ellos que se preocupan de lo que está sucediendo) como nosotros mismos.

—No estamos seguros — nos dicen —, pero hemos reunido pruebas que indican que la clave para la comprensión del universo eres *tú.*

Esta forma de contemplar el mundo no es sólo distinta de la que hemos venido empleando en los últimos trescientos años, sino *opuesta.* La distinción entre el «aquí dentro» y «allí fuera», en el que se fundaba la ciencia, se está haciendo cada vez más confusa. Hemos llegado a un estado de cosas en el que no sabemos cómo resolver el rompecabezas. ¡Los Científicos que utilizaban la distinción entre «dentro» y «fuera» han descubierto que es posible que esta distinción no exista! Lo que está «allá fuera» depende, aparentemente, en un riguroso sentido matemático y filosófico de lo que nosotros decidamos «aquí dentro».

La nueva física nos dice que un observador no puede observar sin alterar lo que vea. Observador y observado están interrelacionados en un sentido real y fundamental. La exacta naturaleza de esa interrelación no está clara, pero existe un creciente conjunto de pruebas de que la distinción entre el «aquí dentro» y el «allá fuera» es ilusión.

El marco conceptual de la mecánica cuántica, apoyado por una gran cantidad de datos experimentales, fuerza a los físicos contemporáneos a expresarse de un modo que suena, incluso para los no iniciados, como el lenguaje de la mística.

El acceso al mundo físico se consigue mediante la experiencia. El denominador común de todas las experiencias es el «Yo» que las hace. En resumen, lo que experimentamos no es la realidad externa sino nuestra interacción con ella. Ésta es una hipótesis fundamental de «complementariedad».

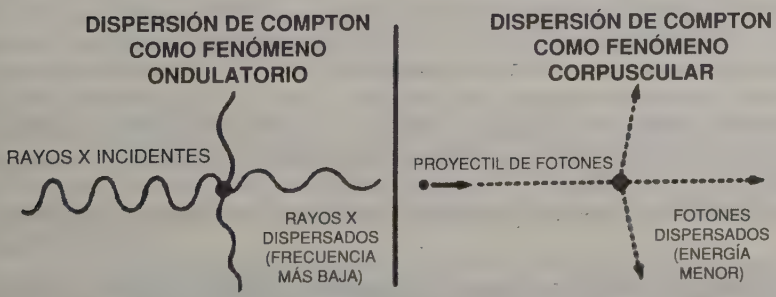
Complementariedad es el concepto desarrollado por Niels Bohr para explicar la dualidad onda-partícula de la luz. Hasta ahora nadie ha pensado una explicación mejor. Las características ondulatorias y las características corpusculares, dice la teoría, son aspectos mutuamente excluyentes o complementarios de la luz. Uno de ellos siempre excluye al otro porque la luz (como cualquier otra cosa) no puede participar de las características de las ondas y de las partículas de manera simultánea.*

* Acontecimientos individuales son siempre de carácter corpuscular; la conducta ondulatoria es detectada como un modelo estadístico, es decir, por su interferencia. Sin embargo, en las palabras de Paul Dirac (otro de los fundadores de la mecánica cuántica) incluso una sencilla partícula subatómica «interfiere consigo misma». La forma como una simple partícula subatómica, por ejemplo un electrón, «interfiere consigo misma» es la básica paradoja del quanto.

¿Cómo pueden estos tipos de comportamiento ondulatorio y corpuscular, recíprocamente excluyentes, ser propiedades de una misma luz? La respuesta es: Porque no son propiedades de la luz. Son propiedades de nuestra *interacción* con la luz. El que la luz se manifieste en ondas o partículas dependerá de la forma de experimento que elijamos. Si queremos demostrar las características ondulatorias de la luz podemos realizar el experimento de la doble rendija, que produce interferencia. Si elegimos demostrar las características corpusculares de la luz podemos realizar el experimento que ilustra el efecto fotoeléctrico. Y podemos hacer que la luz manifieste características ondulatorias y corpusculares realizando el famoso experimento de Arthur Compton.

En 1923 Compton jugó la primera partida de billar con partículas subatómicas y en el curso de su experimentos confirmó la teoría del fotón luminoso de Einstein que contaba ya diecisiete años. Como idea su experimento no resultaba difícil. Simplemente disparó rayos X — que todo el mundo sabe son ondas — sobre electrones. ¡Ante la sorpresa de la mayoría los rayos X desplazaron a los electrones como si (los rayos X) fuesen corpúsculos! Por ejemplo, los rayos X que chocaron oblicuamente con los electrones fueron débilmente desviados de su camino. En la colisión no perdieron mucha energía. Sin embargo, los rayos X que chocaron más de frente con los electrones fueron desviados fuertemente y estos rayos perdieron una gran cantidad de su energía cinética (energía de movimiento) en la colisión.

Compton estuvo en condiciones de decir cuánta energía perdieron los rayos X desplazados midiendo sus frecuencias antes y después de la colisión. Las frecuencias de los rayos X que chocaron de frente eran notablemente más bajas después que antes del choque. Esto significa que tenían menos energía después del choque antes de éste. Los rayos X en el experimento de Compton chocaron con los electrones exactamente del mismo modo que una bola de billar choca con otras bolas de billar.



El descubrimiento de Compton estaba íntimamente relacionado con la teoría del quanto. Compton no hubiera descubierto el comportamiento corpuscular de los rayos X si Planck no hubiese descubierto su regla fundamental de que una frecuencia más alta significa mayor energía. Esta regla permitió a Compton probar que los rayos X en su experimento perdían energía en una colisión corpuscular (porque su frecuencia era más baja después del choque antes del choque).

La paradoja conceptual en el experimento de Compton muestra lo profundamente que la dualidad onda-partícula está integrada en la mecánica cuántica. ¡Compton probó que las radiaciones electromagnéticas, como los rayos X, tenían características corpusculares midiendo sus frecuencias! Naturalmente las «partículas» no tienen frecuencias. La frecuencia es una propiedad de las ondas y sólo ellas la tienen. El fenómeno descubierto por Compton fue bautizado con el nombre de «dispersión de Compton»* en honor de lo que les ocurre a los rayos X.

En resumen, podemos demostrar la naturaleza corpuscular de la luz mediante el efecto fotoeléctrico; que es de naturaleza ondulatoria con el experimento de la doble rendija, y que es de naturaleza corpuscular y de naturaleza ondulatoria con la dispersión de Compton. Estos dos aspectos complementarios de la luz (onda y partícula) son necesarios para entender la naturaleza de la luz. Carece de significado el plantearse cuál de ellos, solo, es la verdadera forma de ser de la luz. La luz se comporta como formada por partículas o por ondas, según el experimento que realicemos con ella.

Ese «nosotros» que lleva a cabo la experimentación es el lazo común que define a la luz como fenómeno corpuscular y a la luz como fenómeno ondulatorio. El comportamiento ondulatorio, que observamos al realizar el experimento de la doble rendija, no es una propiedad de la luz sino una propiedad de nuestra interacción con la luz. Igualmente, las propiedades corpusculares que observamos con el efecto fotoeléctrico tampoco son características de la luz. También ellas son una propiedad de nuestra interacción con la luz. Ambas formas de comportamiento son propiedades de *interacciones*.

Dado que el comportamiento corpuscular y el ondulatorio son tan sólo propiedades que atribuimos a la luz y puesto que ahora se reconocen no como pertenecientes a la luz (si la complementariedad es correcta) sino a nuestra interacción con la luz, se podría deducir que la luz no tiene propiedades independientemente de nosotros. Decir que algo carece de propiedades es como decir que algo no existe. El paso siguinte en este razonamiento, siguiendo con esa lógica, es inevitable: sin nosotros la luz no existe.

La transferencia de las propiedades que por lo corriente antes atribuía-

* Hemos traducido *scattering* por «dispersión», aunque en realidad *scattering* significa la difusión que experimenta un haz cuando incide en un obstáculo como el de la rendija. (*N. del T.*)

mos a la luz y ahora a nuestra interacción con la luz, priva a esta última de una existencia independiente. Sin nosotros (o sin cualquier otra cosa que interactúe sobre ella) la luz no existe. Esta notable conclusión, sin embargo, no es más que la mitad de la historia. ¡La otra mitad es que, de manera semejante, sin la luz (o sin cualquier otra cosa con la que interactuar) *nosotros no existimos*!

Para decirlo con las palabras de Bohr:

> ... Una realidad independiente, en el sentido físico ordinario, no puede ser atribuida ni a los fenómenos ni a las agencias de observación.[1]

Bajo el nombre de «agencias de observación» es muy posible que Bohr se haya referido a instrumentos y no a seres humanos, pero, filosóficamente, la complementariedad lleva a la conclusión de que el mundo no consiste en cosas sino en interacciones. Las propiedades pertenecen a interacciones y no a cosas con existencia independiente, como la luz. Ése es el modo en que Bohr resuelve la dualidad corpuscular-ondulatoria de la luz. Las implicaciones filosóficas de la complementariedad se hacen más profundas con el descubrimiento de que la dualidad onda-partícula es una característica de todo lo que existe.

Al relatar la historia de la mecánica cuántica vemos que ha progresado de la forma siguiente:

En 1900, estudiando la radiación de los cuerpos negros, Max Planck descubrió que la energía es emitida y absorbida en «trozos», a los que llamó quantos *(quanta)*. Hasta esos días se creía que la energía radiada — como la luz — era de tipo ondulatorio, debido a que Thomas Young demostró en 1803 que la luz produce interferencias (el experimento de la doble rendija) y sólo las ondas pueden producirlas.

Einstein, animado por el descubrimiento de los quantos realizado por Planck, utilizó el efecto fotoeléctrico para ilustrar su teoría de que no sólo está cuantificado el proceso de absorción y emisión de energía, sino que la *propia energía* se presenta en paquetes de determinados tamaños. Gracias a esto los físicos hubieron de enfrentarse a dos tipos de experimentos (experiencias repetibles), cada uno de los cuales parecía desmentir al otro. Ésta es la famosa dualidad onda-partícula que resulta fundamental para la física del quanto.

Mientras los físicos seguían tratando de explicar cómo las ondas pueden ser partículas, un joven príncipe francés, Louis de Broglie, soltó una bomba que demolió todo lo que aún quedaba del punto de vista clásico. ¡No sólo las ondas son partículas, propuso, sino que las partículas son también ondas!

La idea de Broglie, que estaba contenida en su tesis doctoral, era que la materia tenía ondas que se «correspondían» con ella. Ese pensamiento era algo más que una especulación filosófica. Era, también una especulación

matemática. Utilizando las sencillas ecuaciones de Planck y Einstein, de Broglie formuló por su parte otra sencilla ecuación.* Mediante ella se determina la longitud de onda de las «ondas de materia» que corresponden a la materia. La ecuación dice, simplemente, que mientras mayor es el momento de una partícula, más pequeña es la longitud de onda asociada.

Esto explica por qué las ondas de materia no son evidentes en el mundo macroscópico. La ecuación de de Broglie nos dice que las ondas de materia que corresponden a un objeto, por pequeño que éste sea, son tan increíblemente pequeñas en relación con el propio objeto que su efecto es despreciable. Sin embargo, cuando descendemos al mundo de lo pequeño, tan pequeño como una partícula subatómica, por ejemplo, un electrón, ¡el tamaño del electrón es menor que la longitud de su onda asociada!

En esas circunstancias la conducta ondulatoria de la materia debía quedar evidentemente clara y la materia debía comportarse de manera distinta a como lo hace «la materia» tal y como pensamos de ella. Y eso es exactamente lo que sucede.

Solamente dos años después de que de Broglie presentase esta hipótesis, un técnico llamado Clinton Davisson, que trabajaba con su ayudante Lester Germer, en los laboratorios de la Bell Telephone, comprobó su teoría experimentalmente. Ambos, Davisson y de Broglie ganaron el Premio Nobel y a los físicos les quedó la tarea de explicar no sólo por qué las ondas pueden ser partículas, sino también por qué las partículas pueden ser ondas. El famoso experimento de Davisson-Germer se realizó de manera accidental y mostró electrones que se reflejaban en una superficie de cristal de un modo que solamente podía explicarse si los electrones fueran ondas. Pero, naturalmente, los electrones son partículas.

En la actualidad la difracción del electrón, una aparente contradicción en sus términos, es un fenómeno normal y común. Cuando un rayo de electrones es enviado a través de un diminuto orificio, como los espacios entre los átomos de una hoja de metal, que son tan pequeños o más pequeños que las longitudes de onda de los electrones (¡qué ridículo...! ¡Las «partículas» *no tienen* longitud de onda!) el rayo se difracta exactamente del mismo modo que lo hace un rayo de luz. Pese a que de acuerdo con la física clásica esto es algo que no puede suceder, el grabado muestra una imagen de ello.

Resultaba desconcertante ver que la luz, que está formada de ondas, comenzaba a comportarse como si estuviera formada de partículas, pero por si eso no fuera bastante, ahora los electrones *son* partículas, comenzaban a comportarse como ondas, con lo cual la trama se hacía realmente complicada.

* Ecuación de Planck: $E = h\nu$. Ecuación de Einstein: $E = mc^2$. Ecuación de de Broglie: $\lambda = h/mv$.

*

La revelación de la mecánica cuántica era (y lo sigue siendo) un drama de gran suspense. Werner Heisenberg escribió:

> «Recuerdo cambios de impresiones con Bohr (en 1927) que duraban muchas horas, hasta muy entrada la noche, y acababan casi con desesperación; cuando, terminadas nuestras discusiones, salía solo a dar un paseo por un parque vecino me iba repitiendo a mí

* Si se mantiene la fotografía frente a uno, el rayo de electrones (el «rayo transmitido») se dirige directamente hacia quien la contempla, partiendo de la gran mancha blanca situada en el centro. En la mancha blanca se halla, también, el material difractante (en este caso el haz de electrones es difractado por pequeños granos de oro; el haz se dirige a una delgada lámina de oro policristalino). Los anillos de la fotografía señalan los lugares en los que los haces de electrones difractados chocaron con la película colocada en el lado opuesto de la fuente de electrones. La mancha blanca del centro fue causada por los electrones no-difractados del haz que, pasando a través de la lámina, chocó directamente con la película.

mismo, una y otra vez, la pregunta: ¿Es posible que la naturaleza sea tan absurda como nos lo parece en estos experimentos atómicos?»[2]

Experimentos subsiguientes revelarían que no sólo las partículas subatómicas, sino también los átomos y las moléculas, tienen asociadas ondas de materia. El título del libro pionero de Donald Hughes, *Neutron Optics* ofrece un testimonio elocuente de la combinación entre ondas y corpúsculos a que dio nacimiento la tesis doctoral del príncipe de Broglie. Teóricamente todas las cosas tienen una longitud de onda — un balón de fútbol, un automóvil e, incluso, una persona —, aunque sus longitudes de onda son tan pequeñas que no son apreciables.

El propio de Broglie no resultó una gran ayuda al explicar su teoría. Predijo lo que después probó el experimento de Davisson-Germer: que la materia, igual que los electrones, tenía un aspecto ondulatorio. Su ecuación incluso preconizó la longitud de onda de esas ondas. Pese a todo, nadie sabía lo que eran realmente esas ondas (nadie lo sabe ahora tampoco). De Broglie las llamó ondas que «corresponden» a la materia, pero no explicaba qué quería decir con ese «corresponden».

¿Es posible que un físico pueda predecir algo, calcular ecuaciones que lo describen y, sin embargo, no saber de qué está hablando?

Sí. Bertrand Russell lo explica así:

«Las matemáticas pueden definirse como el tema en el cual nunca sabemos de qué estamos hablando, ni siquiera si lo que estamos diciendo es cierto.»[3]

Ésta es la razón por la cual los físicos en Copenhague decidieron aceptar la mecánica cuántica como una teoría completa, pese a que no ofrece una explicación de cómo es el mundo en realidad y pese a que predice probabilidades y no sucesos reales. La mecánica cuántica y, de acuerdo con los pragmáticos, toda la ciencia es un estudio de correlaciones entre experiencias. La ecuación de de Broglie correlaciona experiencias de modo correcto.

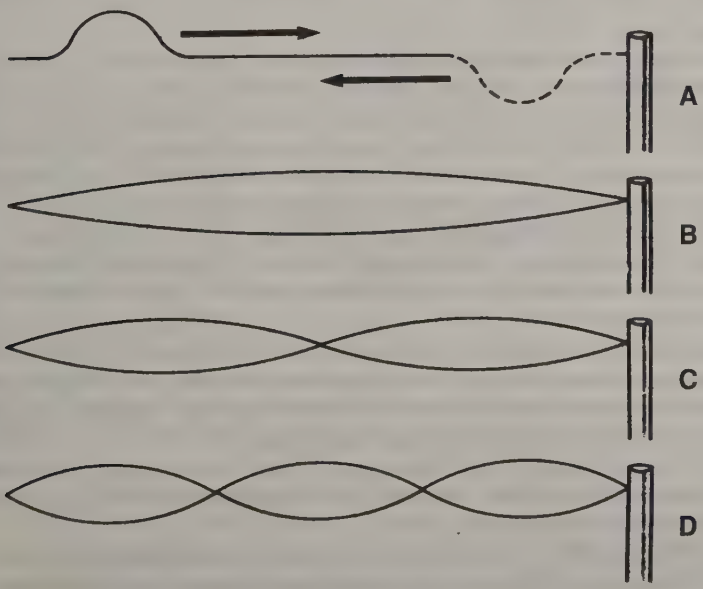
De Broglie funde la paradoja onda-partícula que salió a la luz (si es que se puede llamar a eso salir a la luz) gracias al genio de Thomas Young (experimento de la doble rendija) y de Albert Einstein (la teoría del fotón). En otras palabras, conectó entre sí dos de los fenómenos más revolucionarios de la física: la naturaleza cuántica de la energía y la dualidad onda-partícula.

De Broglie presentó su teoría ondulatoria de la materia en 1924. En los tres años siguientes, la mecánica cuántica cristalizó en lo que es esencialmente hoy. El mundo de la física de Newton, simples imágenes mentales y sentido común, desapareció. Y tomó forma una nueva física de una originalidad y fuerza que hace que a uno le dé vueltas la cabeza.

Después de la teoría ondulatoria de la materia de Broglie llega la ecuación de onda de Schrödinger.

A Erwin Schrödinger, el físico vienés, la teoría ondulatoria de la materia de de Broglie le pareció un modo mucho más natural de contemplar los fenómenos atómicos que el modelo planetario del átomo creado por Bohr. El modelo de Bohr, que representa a electrones duros, esféricos, que giran en torno a un núcleo a niveles específicos y que emiten fotones al saltar de un nivel a otro, explica el espectro de color de los átomos simples, pero no nos dice por qué cada capa contiene sólo un número definido de electrones, ni uno más ni uno menos. Tampoco explica *cómo* hacen su salto los electrones, es decir, qué les ocurre entre una y otra capa.

Animado por el descubrimiento de de Broglie, Schrödinger presentó su hipótesis de que los electrones no eran objetos esféricos, sino modelos *de ondas estacionarias.* Las ondas estacionarias son un fenómeno familiar para todo aquel que ha jugado con una cuerda de tender ropa. Supongamos que atamos a un poste un extremo de la cuerda y después tiramos de ella. En la cuerda no hay ondas de ningún tipo, ni inmóviles ni desplazándose. Ahora supongamos que movemos la mano con la que sostenemos la cuerda, fuerte y rápidamente de abajo a arriba. En la cuerda surge una curva, un «bulto», que viaja hasta el poste y después regresa a nuestra mano. Esa curva viajera (figura A) es una onda que se desplaza. Enviando una serie de curvas por la cuerda podemos dar forma y crear los ejemplos



de ondas estacionarias que se muestran en el presente dibujo (y otros que no ofrecemos).

El más simple de esos modelos es el que se muestra en la figura B. Ese modelo se forma mediante la superposición de dos ondas viajeras, una directa y otra reflejada y que viaja en dirección opuesta. Es el modelo, no la cuerda, lo que no se mueve. El punto más ancho de la onda estacionaria permanece inmóvil y lo mismo hacen los puntos en los extremos de la onda. Estos puntos se llaman nodos. En el modelo más simple hay dos nodos en nuestra mano y otro en el poste al que está atada la cuerda. Esos modelos estacionarios, superposición de ondas viajeras, se llaman ondas estacionarias.

No importa la longitud de la cuerda, que sea más larga o más corta, sólo podrá haber en ella un número de ondas estacionarias completas. Es decir, podremos tener un modelo de una onda estacionaria o un modelo de dos, de tres, de cuatro, de cinco, etc., etc., pero nunca podrá haber un modelo formado por una onda y media o de dos y cuarto ondas estacionarias. Estas ondas tienen que dividir la cuerda en secciones completas. Dicho de otro modo: podemos hacer crecer o decrecer el número de ondas estacionarias que hay en la cuerda, pero siempre en un número entero. Esto significa que el número de ondas estacionarias en la cuerda puede crecer o disminuir sólo de manera *discontinua* (¡otra vez esta palabra!)

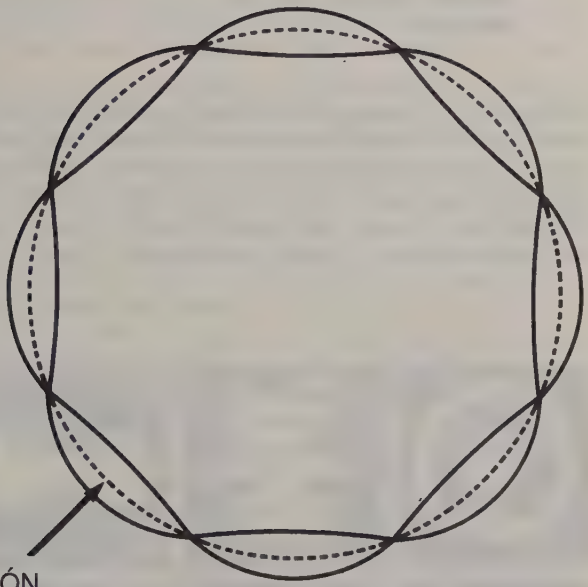
Hay algo más: las ondas estacionarias en una cuerda no pueden ser de un tamaño arbitrario, sino que estos tamaños estarán limitados a tamaños que dividan la cuerda en partes iguales. El tamaño de las ondas depende de la longitud de la cuerda, pero, independientemente de cuál sea esta longitud, sólo habrá ondas de un tamaño que divida a la cuerda en partes iguales.

Todo esto ya era más que sabido en 1925. Tañer una cuerda de guitarra establece en ella modelos de ondas estacionarias. Lo mismo ocurre si se sopla aire en la pipa de un órgano. Lo que era nuevo era el descubrimiento de Schrödinger de que ¡las *ondas estacionarias están cuantizadas del mismo modo que lo están los fenómenos atómicos*! En realidad, Schrödinger deducía de ello que los electrones eran ondas estacionarias.

Visto en retrospectiva quizá esto no suene tan fantástico como sonó entonces. En su época, sin embargo, fue un golpe genial. Representaba gráficamente a un electrón en órbita en torno a un núcleo. Cada vez que el electrón completa una órbita ha viajado una cierta distancia. Esa distancia tiene una determinada longitud, como la cuerda en el ejemplo anterior. Igualmente, pues, sólo un número completo de ondas estacionarias, nunca una fracción de una de ellas, podría formarse en esa longitud. (¿Longitud de qué?, es una pregunta que quedó sin respuesta.)

¡Schrödinger suponía que cada una de esas ondas era un electrón! En otras palabras, Schrödinger propuso que los electrones eran segmentos de vibraciones limitados por los nodos.

Hasta ahora nos hemos referido a las ondas estacionarias en una línea, como una cuerda de colgar ropa o una cuerda de guitarra, pero estas on-



das pueden darse también en otros medios, como el agua. Supongamos que arrojamos una piedra en un estanque redondo. Las ondas se propagarán a partir del punto de choque de la piedra con el agua. Las ondas son reflejadas, a veces más de una vez, por las distintas paredes de la piscina. Cuando las ondas viajeras interfieren una con otra crean un complejo modelo de ondas estacionarias en el que volvemos a encontrar a nuestra antigua amiga, la interferencia.

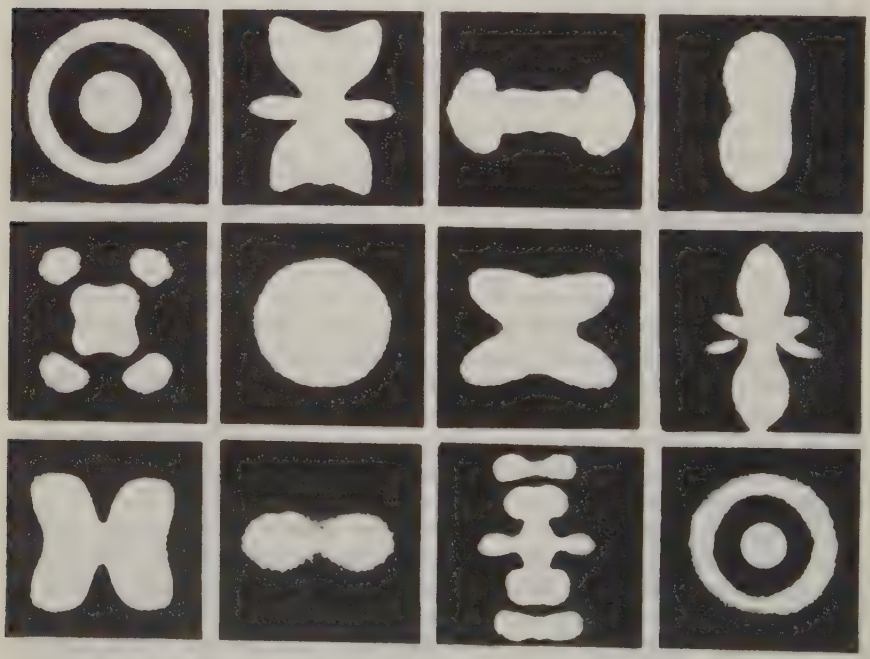
Cuando la cresta de una onda encuentra el seno de otra onda, ambas se anulan mutuamente y la superficie del agua, en esa línea de interacción, está en calma. Esas zonas de calma son los nodos que separan entre sí a las ondas estacionarias. En el experimento de la doble rendija, los nodos son las zonas alternas de luz y oscuridad. Las zonas de luz son las crestas de las ondas estacionarias.

Schrödinger eligió como teatro de su experimento una pequeña bañera, con su complejo modelo de intrincadas interferencias, para explicar la naturaleza del átomo. Según se expresó, ese modelo establecía una «analogía» de ondas de electrones en una palangana del tamaño de un átomo.

> «El ingenioso, pero en cierto modo artificial (modelo del átomo de Bohr)... es sustituido por una presunción mucho más natural, el fenómeno ondulatorio de de Broglie. Ese fenómenos ondulatorio forma el *cuerpo* auténtico del átomo. Remplaza a los electro-

nes individuales que en el modelo de Bohr flotan en torno al núcleo.»[4]

Las ondas estacionarias en una cuerda de tender ropa tienen dos dimensiones: largo y ancho. Y las ondas estacionarias en medios como el agua o en los de un tambor tienen tres dimensiones: longitud, anchura y profundidad. Schrödinger analizó el modelo de onda estacionaria del más simple de los átomos, el del hidrógeno, que tiene solamente un electrón. En el hidrógeno calculó, utilizando su nueva ecuación de onda, una multitud de posibles formas de ondas estacionarias. Todas las ondas estacionarias en



Modern College Physves, Harvey White, N.Y., Van Nostrand, 1972

Estas fotografías son de simulaciones mecánicas de distribuciones de densidad de probabilidad de diferentes estados del electrón en el átomo de hidrógeno. En otras palabras, representan dónde será más probable que encontremos al electrón puntual, si lo buscamos, cuando el átomo toma uno de esos estados particulares (existen más estados de los que aquí ofrecemos). Inicialmente, Schrödinger representó gráficamente a los electrones como si fueran nubes tenues que realmente tomaran esas formas.

Un «Salto cuántico» puede ser imaginado como una transición de una a otra de las imágenes aquí representadas, *sin nada en medio.*

una cuerda son idénticas, pero no ocurre así en un átomo. Todas ellas son tridimensionales y todas ellas son diferentes. Algunas tienen el aspecto de círculos concéntricos. Otras parecen mariposas. Y otras como ciertos amuletos, los *mandala*.

Poco después del descubrimiento de Schrödinger, otro físico austriaco, Wolfgang Pauli, descubrió que en un átomo no podía haber dos de estas ondas que tuvieran la misma forma. Cuando una onda toma una forma determinada, excluye a otra de poder tomar esa misma. Por esa razón el descubrimiento pasó a ser conocido como el principio de exclusión de Pauli.

La ecuación de Schrödinger, modificada por el descubrimiento de Pauli, muestra que sólo puede haber dos modelos posibles de onda en el nivel más bajo de energía de Bohr. Por consiguiente, en esa capa más cercana al núcleo no puede haber más que dos electrones. Hay ocho diferentes modelos de onda posibles en el próximo nivel de energía, así, pues, sólo puede haber ocho electrones en él, y así sucesivamente.

Ésas son las cifras del número de electrones que el modelo de Bohr asigna a esos respectivos niveles de energía. En ese aspecto los dos modelos son iguales. En otro terreno importante, sin embargo, son diferentes.

La teoría de Bohr era totalmente empírica. Es decir, la construyó en torno a los hechos observados para explicarlos. Por el contrario, Schrödinger construyó su teoría basándose en la hipótesis de la materia ondulatoria de Broglie.

No sólo utiliza valores matemáticos, sino que también ofrece una explicación consistente de ellos.

Por ejemplo: hay solamente un cierto número de electrones en cada nivel de energía, porque hay sólo un cierto número de modelos posibles de ondas estacionarias en cada nivel de energía. El nivel de energía de un átomo salta sólo desde ciertos valores específicos a otros valores específicos determinados, porque sólo unos modelos de las ondas estacionarias de determinadas dimensiones pueden formarse con el átomo, y no otras.

Aunque Schrödinger estaba seguro de que los electrones eran ondas estacionarias, no lo estaba de qué era lo que ondulaba.* No obstante, estaba convencido de que *algo* formaba las ondas y lo bautizó con el nombre de la letra griega *psi*. (Una «función de onda» y una «función psi» son la misma cosa.)

Para usar la ecuación de onda de Schrödinger hay que incorporar a

* La temprana interpretación de que los electrones eran, literalmente, ondas estacionarias no resistió a un detallado examen y tuvo que renunciarse a ella. Muy pronto, sin embargo, el concepto de probabilidad basado en una función de onda representado a un sistema observado (y desarrollado de acuerdo con la famosa ecuación de Schrödinger) se convierte en herramienta fundamental en la investigación atómica, y la ecuación de Schrödinger se transforma en parte integral de la teoría del quanto. Dado que la ecuación de onda de Schrödinger es no-relativista, no tiene validez con altas energías. Por consiguiente, cuando se trata de partículas de alta energía los físicos utilizan la Matriz S para calcular las posibilidades de transición. (La teoría de la Matriz S se expone en un capítulo posterior.)

ella ciertas características del átomo en cuestión. Eso nos ofrece la evolución en el tiempo de los modelos de las ondas estacionarias que se produce en el átomo. Si preparamos a un átomo en su estado inicial y dejamos que se propague en aislamiento, ese estado inicial, mientras se propaga en aislamiento, se desarrolla en diferentes modelos de ondas estacionarias. El orden de esos modelos es calculable. La ecuación de onda de Schrödinger es el instrumento matemático que usan los físicos para calcular ese orden. Dicho de otra manera: el desarrollo de los modelos de ondas estacionarias en un átomo es determinista. Dadas unas condiciones iniciales un modelo siempre sigue a otro, de acuerdo con la ecuación de onda de Schrödinger.*

La ecuación de onda de Schrödinger también ofrece una explicación autoconsistente sobre el tamaño átomo de hidrógeno. De acuerdo con ella, el modelo de ondas de un sistema con un electrón y un protón — lo que nosotros llamamos un átomo de hidrógeno — en su estado energético más bajo tiene una magnitud apreciable sólo dentro de una esfera que tiene justamente el diámetro de la más pequeña de las órbitas de Bohr. ¡En otras palabras, ese modelo de onda resulta tener el mismo tamaño que un átomo de hidrógeno en su estado fundamental!

Pese a que la mecánica ondulatoria de Schrödinger se ha convertido en uno de los fundamentos de la actual mecánica cuántica, los aspectos más útiles del modelo de Bohr de los fenómenos subatómicos son utilizados todavía, cuando la teoría ondulatoria no produce resultados apropiados. En tales casos, los físicos se limitan a dejar de pensar en términos de ondas estacionarias y comienzan a pensar, de nuevo, en términos de partículas. Nadie puede decir que no sean adaptables en este terreno.

Schrödinger estaba convencido de que sus ecuaciones describían cosas reales y no obstracciones matemáticas. Representaban al electrón como un ser real expandiéndose sobre sus modelos ondulatorios en forma de una nube tenue. Cuando la representación queda limitada al átomo del hidrógeno, con sólo un electrón, cuyas ondas estacionarias tienen sólo tres dimensiones (largo, ancho y profundidad), imaginarlo es posible. Sin embargo, las ondas estacionarias de un átomo con dos electrones existen en seis dimensiones matemáticas; las ondas en un átomo de cuatro electrones existen en doce dimensiones, etc. «Representarse visualmente todo eso es un ejercicio bastante fuerte.»

En este punto, un físico alemán llamado Max Born puso el toque final a la nueva interpretación ondulatoria de los fenómenos subatómicos. De acuerdo con sus ideas no es necesario ni posible visualizar esas ondas porque *no* son cosas reales, son *ondas de probabilidad.*

> «... el curso total de los acontecimientos está determinado por las leyes de probabilidad; a un estado en el espacio le corresponde

* Hasta que el sistema que se propaga entra en interacción con un instrumento de medida. Esto causa una transición abrupta, impredecible, de un estado a otro (un salto cuántico).

una probabilidad definida, que vendrá dada por la onda de de Broglie asociada con dicho estado.»[5]

Para obtener la probabilidad de un estado dado, elevamos al cuadrado (multiplicamos por sí misma) la amplitud de la onda de materia asociada con dicho estado.

La cuestión de si las ecuaciones de Broglie y Schrödinger representan cosas reales o abstracciones estaba clara para Bohr. A su juicio carecía de sentido pensar en una cosa real que existiese en más de tres dimensiones.

> «Tenemos dos posibilidades. O bien utilizamos ondas en espacios de más de tres dimensiones... o nos quedamos en el espacio tridimensional y rechazamos la sencilla imagen de la amplitud de onda con una magnitud física ordinaria y la reemplazamos por un concepto matemático puramente abstracto... en el que no podemos penetrar.»[6]

Y esto es exactamente lo que hizo.

> «La física — escribió — está en la naturaleza de lo indeterminado y, en consecuencia, es cosa de la estadística.»[7]

Ésta es la misma idea (ondas de probabilidad) en la que Bohr, Kramers y Slater habían pensado anteriormente. Pero ahora, usando las matemáticas de Broglie y Schrödinger, las cifras habían coincidido a la perfección.

La contribución de Born a la teoría de Schrödinger es lo que permite a la mecánica cuántica predecir probabilidades. Puesto que la probabilidad de un determinado estado se encuentra elevando al cuadrado la amplitud de la onda de materia asociada a él y que dadas determinadas condiciones iniciales la ecuación de Schrödinger predice la evolución de esos modelos ondulatorios, ambas cosas en conjunto ofrecen una evolución determinable de las probabilidades. A partir de un estado inicial, los físicos pueden predecir la probabilidad de que un sistema observado pueda ser observado en un estado diferente en cualquier tiempo determinado. Tanto si el sistema observado es observado o no lo es en un determinado estado, incluso si ese estado es el más probable de los estados para ese momento dado, todo es cuestión de pura suerte. En otras palabras, la «probabilidad» de la mecánica cuántica es la probabilidad de observar un sistema observado en un determinado estado en un tiempo dado si fue preparado en un estado inicial dado.*

Esto es lo que desarrolla el aspecto ondulatorio de la mecánica cuántica. Al igual que las ondas tienen características corpusculares (de par-

* Si el estado inicial preparado es el estado ψ (t), la probabilidad de que pueda ser observado estando en el estado ϕ (t) es $|\langle\psi\ (t)\,|\,\phi\ (t)\rangle|^2$. Si está preparado en el estado ψ (t), entonces la probabilidad de ser observado en una región Δ en el tiempo t es $\Delta\int_d{}^3x \times \psi^*\ (x,\ t) \times \psi\ (x,\ t)$.

tícula) (Planck, Einstein), las partículas o corpúsculos tienen características ondulatorias (de Broglie). En realidad, las partículas pueden ser entendidas en términos de ondas estacionarias (Schrödinger). Dadas unas condiciones iniciales, puede ser calculada una evolución precisa de los modelos de ondas estacionarias, calculadas a su vez por medio de la ecuación de onda de Schrödinger. Elevando al cuadrado la amplitud de una onda de materia (función de onda) se obtiene la probabilidad del estado que corresponde a esa onda (Born). Y así una secuencia de probabilidades podría ser calculada a partir de condiciones iniciales determinadas, utilizando la ecuación de onda de Schrödinger y la simple fórmula de Born.

Hemos recorrido un camino muy largo desde los experimentos de Galileo con los cuerpos en caída. Cada paso en ese camino nos ha llevado a un nivel más alto de abstracción: primero a la creación de cosas que nadie ha visto nunca (como los electrones) y después a abandonar todos los intentos de representarnos nuestras abstracciones.

El problema es que por nuestra propia naturaleza humana nosotros no cejamos en nuestros intentos de representarnos esas abstracciones. Continuamos preguntándonos «¿De qué están hechas esas abstracciones?» y, seguidamente, tratamos de visualizar lo que quiera que sea.

Antes abandonamos el modelo planetario del átomo, obra de Bohr, con la promesa de que posteriormente volveríamos a ver «cómo piensan actualmente los físicos sobre el átomo». Bien, ya ha llegado ese momento, pero la tarea es bastante difícil. Rechazamos la antigua representación del átomo de manera tan fácil porque supusimos que sería remplazada por otra más significativa, pero igualmente lúcida. Ahora resulta que nuestra imagen sustitutiva no es una representación, sino una abstracción que no puede ser visualizada. Esto resulta desagradable porque nos recuerda que los átomos, de todos modos, nunca fueron cosas «reales». Los átomos son entes hipotéticos construidos para hacer inteligibles las observaciones experimentales. Nadie, ni una sola persona, ha visto jamás un átomo. Sin embargo, nosotros estamos acostumbrados de tal modo a la *idea* de que un átomo es una cosa que nos olvidamos de que es una idea. Ahora se nos dice no sólo que el átomo es una idea sino que se trata de una idea que nunca podremos representar.

Además, cuando los físicos se refieren a los entes matemáticos en castellano (o en inglés, o en alemán o en danés), las palabras que usan están destinadas a crear imágenes para los legos que las oyen, pero que no están familiarizados con las matemáticas a las que esas palabras se refieren. Después de haber ofrecido esta larga explicación de por qué motivos no puede representarse un átomo, veremos cómo lo representan los físicos en la actualidad.

Un átomo consiste en un núcleo y electrones. El núcleo está situado en el centro del átomo. Ocupa solamente una pequeña parte del volumen del átomo, pero tiene casi toda su masa. Es decir, que el núcleo es igual que en el modelo planetario. También, al igual que en modelo planetario, los

electrones se mueven dentro de la zona general del núcleo. En este nuevo modelo, sin embargo, los electrones pueden estar en cualquier parte dentro de una «nube electrónica». La nube electrónica está compuesta de varias ondas estacionarias que rodean el núcleo. Las ondas estacionarias no son materiales. Son modelo de potencial. La forma de las diversas ondas estacionarias que comprenden la nube de electrón le dice a los físicos la probabilidad de encontrar el electrón en un determinado lugar de la nube.

En resumen, los físicos siguen imaginando todavía a un átomo como un núcleo rodeado de electrones que se mueven a su alrededor, pero la imagen no es tan simple como la de un sistema solar en miniatura. La nube de electrones es un concepto matemático que los físicos han construido para correlacionar sus experiencias. Las nubes de electrones pueden existir o no existir realmente en el interior del átomo. Nadie lo sabe con certeza. Sin embargo, sabemos que el concepto de la nube de electrones ofrece las probabilidades de localizar el electrón en distintos lugares en torno al núcleo de un átomo y que esas probabilidades se han determinado empíricamente para que resulten muy precisas.

En este sentido, las nubes de electrones son semejantes a funciones de onda. Una función de onda es también un concepto matemático que han construido los físicos para que se correlacione con sus experiencias. Las funciones de onda puede ser que existan o que no «existan en realidad». (Este tipo de declaración presupone una diferencia cualitativa entre pensamiento y materia que es posible no sea una buena suposición.) Sin embargo, el concepto de una función de onda ofrece, innegablemente, las probabilidades de observar un sistema que está en un estado determinado en un momento dado si se prepara de manera adecuada.

Al igual que las funciones de onda, las nubes de electrones no pueden ser visualizadas. Una nube de electrones que contenga sólo un electrón (como la de un átomo de hidrógeno) existe en tres dimensiones. Todas las demás nubes de electrones, sin embargo, contienen más de un electrón y, por consiguiente, existen en más de tres dimensiones. El núcleo del simple átomo de carbono, por ejemplo, con sus seis electrones está rodeado por una nube de electrones de dieciocho dimensiones. El uranio, con sus noventa y dos electrones, tiene una nube de electrones de 276 dimensiones. (De manera semejante, una función de onda contiene tres dimensiones para cada posibilidad que representa.) Está muy claro que la situación, en términos de representación mental, queda poco clara.

Esta ambigüedad resulta del intento de describir con conceptos limitados (lenguaje), situaciones que no están sujetas a esas mismas limitaciones. Enmascara la realidad de que *no sabemos* lo que realmente ocurre en el mundo subatómico. Los modelos que utilizamos «son creaciones libres de la mente humana» para usar las palabras de Einstein (pág. 29), que satisfacen nuestra innata necesidad de correlacionar experiencias de manera racional. Son suposiciones de lo que «realmente» sucede dentro del reloj imposible de abrir. Resulta extremadamente engañoso el pensar que describen realmente alguna cosa.

De hecho, un joven físico alemán, Werner Heisenberg, decidió que nosotros *nunca* podremos llegar a saber lo que realmente ocurre en el invisible terreno subatómico y, por tanto, «debemos abandonar todos los intentos de construir modelos percibibles de los procesos atómicos».* Legítimamente, todo lo que podemos usar para trabajar con ello, según esta teoría, es la observación directa. Todo lo que sabemos es aquello que tenemos al principio del experimento y lo que hallamos al término de él. Toda explicación de lo que realmente ocurre entre esos dos estados — que son los observables (pág. 86) — es pura especulación.

Casi al mismo tiempo (1925), pero de manera independiente de de Broglie y Schrödinger, Heisenberg, que tenía sólo veinticinco años de edad, se lanzó a la tarea de desarrollar un medio para organizar los datos experimentales en forma tabular. Tuvo la suerte de que sesenta y seis años antes un matemático escocés llamado W. R. Hamilton había desarrollado un método de organizar datos en series o tablas matemáticas llamadas matrices. En esa época las matrices de Hamilton estaban consideradas como un accesorio más de la matemática pura. ¿Quién podía suponer que un día iba a ser incorporada, como una pieza hecha a la medida, en la estructura de una física revolucionaria?

Para utilizar las tablas de Heisenberg, basta con leer en ellas, o calcular partiendo de ellas, las probabilidades que van asociadas a las condiciones iniciales. Utilizando este método, que Heisenberg llamó *mecánica matricial,* sólo utilizamos observables físicos, lo cual significa esas cosas que conocíamos al principio del experimento y aquellas otras que sabemos de él a su fin. No hacemos especulaciones sobre lo sucedido entre estos dos puntos.

Después de veinticinco años de esfuerzos por conseguir una teoría que remplazara a la física de Newton, de repente los físicos se encontraron con dos distintas, cada una de las cuales significaba un método único de aproximación a la misma cosa: la mecánica ondulatoria de Schrödinger, basada en las ondas de la materia de de Broglie; y la mecánica matricial de Heisenberg, basada en la imposibilidad de análisis de los fenómenos subatómicos.

Un año después de que Heisenberg desarrollase su mecánica matricial, Schrödinger descubrió que resultaba matemáticamente equivalente a su propia mecánica ondulatoria. Dado que embas teorías eran instrumentos valiosos para la investigación subatómica, las dos teorías se incorporaron a la nueva rama de la física que pasó a ser conocida como la mecánica cuántica.

Mucho más tarde, Heisenberg aplicó la matemática matricial a los experimentos sobre la colisión de corpúsculos de alta energía. Dado que tales experimentos siempre tienen como resultado la dispersión de partículas, se le llama la matriz de dispersión o Matriz S (del inglés *scattering*). En la actualidad los físicos tienen dos caminos para calcular las probabilidad de transición entre lo que observan al principio de un experimento de mecánica cuántica y lo que observan a su término.

El primer método es la ecuación de onda de Schrödinger y el segundo la matriz S. La ecuación de onda de Schrödinger describe un desarrollo temporal de posibilidades, una de las cuales se realiza de repente cuando realizamos una medición en el transcurso de un experimento mecánico cuántico; la matriz S brinda directamente las probabilidades de transición entre los observables sin ofrecer ninguna indicación de un desarrollo en el tiempo, o de la falta de él, o de cualquier otra cosa. Ambas funcionan.*

Si resultó de gran importancia la introducción de las matemáticas de la matriz en la nueva física, el siguiente descubrimiento de Heisenberg conmovió los cimientos de las «ciencias exactas». Probó con él que no existía, a nivel subatómico, nada que pudiera ser llamado «ciencias exactas».

El notable descubrimiento de Heisenberg fue que hay límites por debajo de los cuales no podemos medir con exactitud, al mismo tiempo, los procesos de la naturaleza. Esos límites no están marcados por la naturaleza defectuosa de nuestros instrumentos de medición o por lo extremadamente pequeño de las entidades que intentamos medir, sino más bien por la forma como la propia naturaleza se nos presenta. En otras palabras, existe una barrera de ambigüedad al otro lado de la cual no podemos pasar nunca sin aventurarnos en el terreno de la incertidumbre. Por esta razón el descubrimiento de Heisenberg se llamó Principio de Incertidumbre.

El principio de incertidumbre revela que a medida que vamos penetrando cada vez más profundamente en el terreno de lo subatómico llegamos a un punto en el cual una parte u otra de nuestra imagen de la naturaleza se hace borrosa y no hay forma de aclararla sin hacer borrosa otra parte de la imagen. Es como cuando tratamos de ajustar una imagen en movimiento que está ligeramente fuera de foco. Una vez terminados los ajustes necesarios vemos con sorpresa que cuando el lado derecho de la imagen se aclara el lado izquierdo queda desenfocado y no puede reconocerse nada. Si tratamos de enfocar el lado izquierdo, el lado derecho empieza a hacerse borroso y pronto la situación queda invertida. Si tratamos de conseguir un equilibrio entre ambas situaciones extremas, ambos lados de la imagen vuelven a unas condiciones que permiten reconocer su contenido, pero en ningún caso se puede eliminar la turbiedad original de la imagen.

La parte derecha de la imagen, en la formulación original del principio de incertidumbre, corresponde a la posición en el espacio de una partícula en movimiento. La parte izquierda corresponde a su momento. De acuerdo con el principio de incertidumbre no podemos medir con exactitud al mismo tiempo la posición *y* el momento de una partícula en movimiento. Mientras más precisamente determinemos una de esas propiedades, menos

* La ecuación ondulatoria de Schrödinger es válida en bajas energías, pero, sin embargo, debido a que es no-relativista, no es válida para las energías elevadas. Por consiguiente, los físicos especializados en el estudio de las partículas utilizan la matriz S (que se explicará con detalle en un capítulo posterior).

conoceremos la otra. Si determinamos con exactitud la posición de la partícula, por extraño que parezca, no podemos hacer nada para saber su momento. Si determinamos con precisión su momento no hay forma de localizar su posición.

Para ilustrar esta extraña declaración, Heisenberg propuso que imagináramos un supermicroscopio de alto poder de resolución — lo suficientemente potente para poder ver un electrón moviéndose en torno al núcleo, en su órbita —. Dado que los electrones son tan pequeños, no podríamos usar luz ordinaria en nuestro microscopio porque la longitud de onda de la luz ordinaria es demasiado grande para «ver» a los electrones, del mismo modo las grandes olas a mar abierto apenas si son afectadas por una pequeña boya o un poste cualquiera que emerja de la superficie del mar.

Si tomamos un mechón de pelo y lo colocamos entre una luz brillante y un muro, los cabellos no proyectan una sombra precisa. Los cabellos son tan delgados, en comparación con la longitud de onda de la luz, que las ondas lumínicas se doblan en torno de ellos en vez de ser obstruidas por ellos. Para ver algo tenemos que obstruir las ondas lumínicas con lo que estamos viendo. En otras palabras, para ver algo tenemos que iluminarlo con longitudes de onda más pequeñas que ese algo. Por esta razón Heisenberg sustituyó en su teórico e imaginario microscopio los rayos de luz visible por rayos gamma. Los rayos gamma tienen la longitud de onda más corta conocida que es exactamente la que necesitamos para poder ver un electrón. Un electrón es lo suficientemente grande, en comparación con la longitud de onda de los rayos gamma, por lo que estos últimos podrían ser obstruidos por el electrón y dejarían su sombra en la pared. Eso nos permitiría localizar los electrones.

El único problema, y es aquí donde interviene la física cuántica, es que de acuerdo con el descubrimiento de Planck, los rayos gamma, que tienen una longitud de onda mucho más pequeña que la luz ordinaria visible, contien muchísima más energía. Cuando un rayo gamma incidiera sobre el imaginario electrón lo iluminaría, pero, desgraciadamente, también lo expulsaría de su órbita y cambiaría su velocidad y dirección (su momento) de manera impredecible e incontrolable. (No podemos calcular con precisión el ángulo de rebote entre una partícula, como un electrón, y una onda, como un rayo gamma.) En resumen, si usamos luz con una longitud de onda lo suficientemente corta para localizar el electrón, causamos un cambio imposible de determinar en el momento del electrón.

La única alternativa es utilizar una luz menos energética. Pero es precisamente esa luz menos energética la causa original de nuestro problema: la luz con una energía lo suficientemente baja para no alterar la trayectoria del electrón ni su momento, tendría una longitud de onda tan larga que no sería capaz de mostrarnos dónde está el electrón. Es decir, que no hay modo de conocer al mismo tiempo la posición y el momento de una partícula en movimiento. Todos los intentos de observar a un electrón alteran al electrón.

Éste es el significado primario del principio de incertidumbre. A nivel

subatómico *no podemos observar algo sin afectarlo.* No existe el observador independiente que puede mantenerse al margen observando como la naturaleza sigue su curso sin afectar al objeto observado.

En cierto modo esta declaración no debe resultar demasiado sorprendente. Un buen modo de hacer que una persona extraña se gire para mirarlo a uno es mirarla a ella intensamente desde atrás. Todos conocemos eso, pero en muchas ocasiones no damos crédito a lo que conocemos cuando se contradice con aquello que se nos enseñó que era posible. La física clásica parte de la aceptación de que nuestra realidad, independientemente de nosotros, sigue su curso en el espacio y en el tiempo de acuerdo con rígidas leyes causales. No sólo podemos observarlo sin ser percibidos, sino incluso predecir su futuro, aplicando las leyes de la causalidad a las condiciones iniciales. En este sentido el principio de incertidumbre de Heisenberg es una declaración *muy* sorprendente.

No podemos aplicar las leyes de movimiento de Newton a un corpúsculo considerado de manera individual que no tiene una ubicación inicial y un momento, que es exactamente lo que el principio de incertidumbre nos dice que no podemos determinar. En otras palabras: es imposible, incluso en principio, llegar a conocer lo suficiente de una partícula, en el terreno de lo subatómico, para aplicarle las leyes de movimiento de Newton que, durante tres siglos fueron los fundamentos de la física. *Las leyes de Newton no rigen en el terreno de lo subatómico.** (Ni siquiera los *conceptos* de Newton tienen aplicación en el terreno de lo subatómico.) Dado un haz de electrones, la teoría del quanto puede predecir la probable distribución de los electrones en un espacio dado y en un tiempo dado, pero la teoría del quanto no puede predecir, ni siquiera en principio, el curso de un simple electrón. Toda la idea de un universo causal está minada por el principio de incertidumbre. En relación con este contexto, Niels Bohr escribió que la mecánica cuántica, por su propia esencia, establece:

> «... la necesidad de una renuncia definitiva del ideal clásico de la causalidad y de una revisión radical de nuestra actitud con respecto a los problemas de la realidad física.»[9]

Ésta es otra de las implicaciones sorprendentes del principio de incertidumbre. Los conceptos de posición y momento están íntimamente ligados a nuestra idea de lo que es una cosa llamada partícula en movimiento. Pero según resulta no podemos determinar simultáneamente la posición y el momento de una partícula en movimiento, contrariamente a nuestra presunción de siempre de que podríamos hacerlo. Por consiguiente, nos

* Hablando en propiedad, las leyes de Newton no desaparecen totalmente en el campo de lo subatómico: siguen válidas como ecuaciones con operadores. Es decir, en algunos experimentos relacionados con las partículas subatómicas, las leyes de Newton pueden tomarse como una buena aproximación a la descripción de lo que está sucediendo.

vemos forzados a admitir que esa cosa que veníamos llamando una partícula en movimiento, sea lo que sea, no es la «partícula en movimiento» que nosotros creíamos que era, puesto que las partículas en movimiento siempre tienen posición y momento.

Como lo expresó Max Born:

> «... si nunca podemos determinar realmente más que una de las dos propiedades (posesión de una posición definida y un momento definido), y si cuando una de ellas es determinada no podemos hacer ninguna afirmación sobre la otra propiedad en el mismo momento, en tanto nuestro experimento continúe, entonces no tenemos justificación alguna para afirmar que la cosa que estamos examinando pueda ser descrita como una partícula, en el sentido usual que le damos al término.»[10]

De todos modos, sea lo que sea lo que estamos observando, puede tener un momento determinable y una posición determinable, pero de ambas propiedades a la hora de realizar la observación *tenemos que elegir una* para cada instante determinado, a la que colocar bajo el foco de nuestra observación si queremos verla con claridad, sin turbiedad. ¡Con respecto a las partículas en movimiento eso significa, en cualquier circunstancia, que no podemos verlas de la manera que son «realmente» sino únicamente de la manera que hayamos decidido elegir para verlas!

Heisenberg escribió al respecto:

> «Lo que observamos no es la naturaleza en sí, sino la naturaleza expuesta a nuestro método de interrogación.»[11]

Desde un punto de vista riguroso cabe afirmar que el principio de incertidumbre nos lleva a darnos cuenta de que no existe una senda «mía», un camino individual, que esté separado del mundo que lo rodea. Pone en tela de juicio la propia existencia de una realidad objetiva, tal y como hacen la complementariedad y el concepto de las partículas en mutua correlación.

Se han cambiado las tornas. «Las ciencias exactas» ya no estudian una realidad objetiva que sigue su curso sin tener en cuenta si nos interesamos por ellas o no. Nos han dejado solos para que nos las entendamos lo mejor que podamos, mientras ellas continúan su senda predeterminada. La ciencia a nivel de los acontecimientos subatómicos ya no es «ciencia exacta» y la distinción entre lo objetivo y lo subjetivo se desvaneció hace ya mucho tiempo. Los ventanales por los que el universo se nos manifiesta

son, como ya supimos mucho tiempo atrás, esos impotentes y pasivos testigos directos de su desarrollo: los «Yos», de los cuales nosotros, en nuestra insignificancia, somos ejemplo.

Si la nueva física nos ha conducido a alguna parte, ha sido al encuentro de nosotros mismos. Al único lugar, desde luego, al que podemos ir.

INSENSATEZ

MENTE DE PRINCIPIANTE

La importancia de la insensatez es tal que difícilmente puede ser superexpresada. Mientras con mayor claridad experimentemos algo como una «insensatez», más claramente estamos experimentando los límites de nuestras propias estructuras cognoscitivas autoimpuestas. «Insensatez» es aquello que no cabe dentro de los modelos previamente establecidos que hemos sobreimpuesto a la realidad. No hay nada que pueda ser calificado de insensatez «aparte del juicio intelectual que lo llama así».

Los artistas auténticos y los físicos auténticos saben que insensatez es sólo aquello que, contemplado desde nuestro actual punto de vista, resulta ininteligible. Insensatez es insensatez solamente cuando todavía no hemos encontrado el punto de vista sobre ella que la haga tener sentido.

En general, los físicos no se ocupan de lo insensato. La mayor parte de ellos se pasan sus vidas profesionales pensando de acuerdo con normas de pensamiento largo tiempo preestablecidas. Los científicos que establecen las líneas de pensamiento no establecidas, sin embargo, son aquellos que no tienen miedo de aventurarse audazmente en la insensatez, en aquello que cualquier estúpido hubiera afirmado que claramente no es así. Ése es el signo de la mente creadora; en realidad ése es el proceso creativo. Se caracteriza por una firme confianza, que lo resiste todo, en que existe un punto de vista desde el cual lo insensato no es insensato en absoluto, sino que resulta evidente.

En la física, como en cualquier otra materia, aquellos que han experimentado el entusiasmo del proceso creativo son los que más audazmente han cruzado los límites del conocimiento, para aventurarse en territorios inexplorados que están más allá de la barrera de lo obvio. Ese tipo de personas tiene dos características: la primera de ellas es una habilidad infantil para ver el mundo como es y no como se nos aparece de acuerdo con lo que sabemos de él. Ésta es la moraleja del cuento (¿infantil?) «Los nuevos ropajes del emperador». Cuando el emperador andaba desnudo por las calles, sólo un niño se atrevió a decir que iba sin ropas, mientras que el resto de sus súbditos se esforzaban en creer — porque así se lo habían dicho — que llevaba sus nuevos y más finos ropajes.

El niño que hay en nosotros es siempre inocente, *naïf* en el sentido

más simplista. Una leyenda Zen nos habla de Nan-in, un maestro japonés de la Era Meiji, que recibió a un profesor universitario. El profesor acudió a él para informarse sobre Zen. Nan-in sirvió el té. Llenó la taza de su visitante y cuando estuvo llena continuó vertiendo té. El profesor observó en silencio el rebosar de la taza hasta que llegó un momento en que no pudo contenerse.

—La taza está llena. Ya no cabe más en ella.

—Como esta taza, usted está lleno de sus propias opiniones y especulaciones — le respondió Nan-in —. ¿Cómo podría yo mostrarle lo que es Zen mientras no haya vaciado usted su taza?

Nuestra taza por lo general está llena hasta el borde con lo «obvio», con el «sentido común» y lo «autoevidente».

Suzuki Roshi, que estableció el primer centro de Zen en Estados Unidos (sin intentarlo, desde luego, como es muy propio del Zen) les dijo a sus estudiantes que no resultaba difícil conseguir la iluminación, pero sí conservar una mente de principiante.

«En la mente del principiante — les dijo — existen múltiples posibilidades, pero en la del experto muy pocas.»

Cuando sus estudiantes publicaron las charlas de Suzuki, después de su muerte, titularon al libro, muy apropiadamente, *Mente de Zen, Mente de Principiante.* En la introducción escribió Baker Roshi, el Maestro Zen norteamericano:

> «La mente del principiante está vacía, libre de los hábitos del experto, dispuesta a aceptar, a dudar, y abierta a todas las posibilidades...»[1]

La mente del principiante, en lo referente a la ciencia, está magníficamente descrita por la historia de Albert Einstein y su teoría de la relatividad. Ése es el tema de este capítulo.

La segunda característica del verdadero artista y del verdadero científico es la firme confianza que ambos tienen en sí mismos. Esa confianza es la expresión de una fuerza interna que les permite expresarse seguros con el conocimiento de que, cuando las apariencias están en su contra, es el mundo el que está confundido y no ellos.

El primer hombre en ver la ilusión de algo en lo que los hombres estuvieron creyendo durante siglos, está en solitario. En esos momentos de premonición interna, él y sólo él ve lo que, como es obvio, para los no iniciados (el resto del mundo) resulta insensatez o, quizá aún peor, locura o herejía. Esa confianza en sí mismo no es la tozudez del necio, sino la seguridad de quien sabe lo que sabe y, sabe además, que puede hacerlo llegar a los demás de manera plena de sentido.

Henry Miller ha dicho:

> «Yo obedezco únicamente a mi instinto y mi intuición. No sé nada por adelantado. En ocasiones expreso cosas que no compren-

do, con el conocimiento seguro de que más tarde su significado se me hará claro y comprensivo. Tengo fe en el hombre que está escribiendo, que soy yo mismo, el escritor.»[2]

El cantautor Bob Dylan, afirmó en una conferencia de prensa:

«Escribo una canción y sé que va a salir bien. Ni siquiera sé de antemano lo que voy a decir en ella.»[3]

Un ejemplo de ese tipo de fe, en el terreno de la física, fue la teoría de los quantos de luz. En 1905, la teoría comprobada y aceptada era que la luz era un fenómeno ondulatorio. Pese a todo, Einstein publicó su famoso escrito con la teoría de que la luz era un fenómeno corpuscular (página 68). Heisenberg describe esta situación fascinante de esta manera:

«(En 1905) la luz podía ser interpretada como consistente en ondas electromagnéticas, de acuerdo con la teoría de Maxwell, o como consistente en quantos de luz, paquetes de energía que viajan por el espacio a gran velocidad (de acuerdo con Einstein). Pero, ¿podía ser las dos cosas? Einstein sabía, desde luego, que los bien conocidos fenómenos de la difracción y la interferencia sólo podían ser explicados partiendo de la base de su naturaleza ondulatoria. No estaba en condiciones de negar la completa contradicción entre esa imagen ondulatoria y la idea de los quantos de luz; ni siquiera trató de apartar la inconsistencia de esta interpretación. Tomó la contradicción, sencillamente, como algo que, probablemente, sería comprendido mucho más tarde.»[4]

Esto es exactamente lo que ocurrió. La tesis de Einstein condujo a la dualidad onda-partícula de la cual surgió la mecánica cuántica y, con ella, como ahora sabemos, un nuevo modo de contemplar la realidad y a nosotros mismos enormemente diferente del que estamos acostumbrados. Aunque Einstein es conocido popularmente por sus teorías de la relatividad, su escrito sobre la naturaleza cuántica de la luz fue lo que le valió el Premio Nobel. Y es, también, un delicado ejemplo de confianza en la insensatez.

El que algo sea una insensatez o no, es posible que sea solamente cuestión de perspectiva.

—¡Espera un momento! — interrumpe Jim de Wit —. Mi tío, el Raro George, cree ser un balón de fútbol. Desde luego, todos sabemos que eso es una insensatez, pero el tío George piensa que *nosotros* estamos locos. Está convencido de ser un balón de fútbol. Se pasa el día hablando de ello. En otras palabras, tiene una absoluta confianza en su insensatez. ¿Se convierte por esta razón en un gran científico?

No. En realidad lo que ocurre es que el raro de George tiene un pro-

blema. No sólo es él la única persona que tiene esta perspectiva tan particular, sino que esa perspectiva particular no está relacionada en modo alguno con la de otros observadores, lo cual nos conduce al corazón de la teoría especial de la relatividad de Einstein. (Einstein creó dos teorías de la relatividad. La primera se llama teoría especial de la relatividad. La segunda, que llegó bastante más tarde y que es mucho más general, se llama teoría general de la relatividad. Este capítulo y el siguiente tratan de la teoría especial de la relatividad, la primera de las dos teorías de Einstein.)

La teoría especial de la relatividad, más que ocuparse de lo que es relativo, se ocupa de lo que no lo es. Describe de qué modo parecen cambiar los aspectos relativos de la realidad física como dependencia de los puntos de vista de los distintos observadores (en realidad depende del estado de movimiento relativo de uno para con los otros), pero en el proceso define igualmente los aspectos no cambiantes, los aspectos absolutos, de la realidad física.

La teoría especial de la relatividad no es una teoría que expresa la idea de que todo es relativo. Es una teoría que expresa que las *apariencias* son relativas. Lo que puede aparecer ante nosotros como una regla (los físicos dirían una varilla) de treinta centímetros de longitud, puede parecerle que sólo tiene veinticinco centímetros a un observador que pasara a gran velocidad. Lo que puede aparecer ante nosotros como una hora de tiempo puede parecer dos horas para un viajero que pasara junto a nosotros a gran velocidad. Sin embargo, el observador viajero (en movimiento) puede utilizar la teoría especial de la relatividad para determinar como nuestra regla y nuestrc reloj aparecen ante nosotros (si conoce su movimiento relativo para con nosotros) y del mismo modo nosotros podemos utilizar la teoría especial de la relatividad para determinar cómo aparecen nuestra varilla y nuestro reloj ante el observador en movimiento (si conocemos nuestro movimiento en relación con él).

Si tuviéramos que realizar un experimento en el mismo momento en que el observador en movimiento pasa junto a nosotros, nosotros y el observador en movimiento veríamos el mismo experimento, pero cada uno de nosotros recogeríamos diferentes tiempos y distancias, nosotros con nuestra regla y nuestro reloj y él con su regla y su reloj. Utilizando la teoría especial de la relatividad, sin embargo, cada uno puede transferir sus datos al otro marco de referencia. Las cifras finales serían las mismas para ambos. En esencia, la teoría especial de la relatividad no trata de lo que es relativo sino de lo que es absoluto.

La teoría especial de la relatividad muestra que las apariencias dependen del estado de movimiento de los observadores. Por ejemplo, nos dice: (1) un objeto móvil disminuye sus medidas en la dirección de su movimiento a medida que su voluntad aumenta y, cuando alcanza la velocidad de la luz, desaparece; (2) la masa de un objeto mide más a medida que su velocidad aumenta y se convierte en infinita cuando alcanza la velocidad de la luz, y (3) los relojes en movimiento andan más despacio a medida que la

velocidad aumenta hasta que al llegar a la velocidad de la luz se paran por completo.

Todo esto desde el punto de vista del observador con respecto al cual el objeto está en movimiento. Para un observador que viaje conjuntamente con el objeto en movimiento, el reloj mantendría su ritmo con exactitud, marcando sesenta segundos a cada minuto que transcurra y nada tendrá apariencias de ser más corto o de tener mayor masa. La teoría especial de la relatividad nos dice también que el espacio y el tiempo no son cosas separadas sino que conjuntamente forman el espacio-tiempo y que energía y masa son realmente dos formas diferentes de una misma cosa, masa-energía.

—¡Eso no es posible! — gritamos —. Es una insensatez pensar que al aumentar la velocidad de un objeto se incrementa su masa, disminuye su tamaño y retrasa su tiempo.

Nuestra taza rebosa.

Esos fenómenos no son observables en la vida cotidiana porque las velocidades requeridas para hacer apreciables los cambios se aproximan a la velocidad de la luz (300.000 kilómetros — aproximadamente — por *segundo*). En las lentas velocidades con que nos encontramos en el mundo de lo macroscópico, los efectos son realmente indetectables. Si no lo fueran podríamos apreciar que un coche que marcha a gran velocidad por la autopista es más corto que cuando está parado, que pesa más y que su reloj va más despacio. De hecho nos encontraríamos que una plancha caliente pesa más que cuando está fría (porque la energía tiene masa y el calor es energía).

Cómo logró Einstein descubrir esto, es otra versión del cuento de «El emperador con sus nuevos ropajes».

Albert Einstein fue el único que contempló dos de los más importantes rompecabezas de su tiempo y se enfrentó a ellos con una mente de principiante. El resultado fue la teoría especial de la relatividad. El primer misterio de la época de Einstein era la constancia de la velocidad de la luz. El segundo la cuestión de la incertidumbre, tanto física como filosófica, sobre lo que significa estar en movimiento o no estar en movimiento.*

—Espera un momento — preguntamos —. ¿Qué hay de incertidumbre en ello? Si yo estoy sentado en una silla y otra persona pasa andando a mi lado, en ese caso la persona que pasa a mi lado está moviéndose y yo, que estoy sentado en mi silla, no me muevo.

—¡Completamente cierto! — interviene Jim de Wit —, pero la cosa no

* El punto de partida de Einstein para su teoría especial de la relatividad proviene del conflicto entre la relatividad clásica y la predicción de Maxwell de una velocidad de la luz «c». Una leyenda muy repetida cuenta que Einstein trató de imaginarse cómo sería viajar a la misma velocidad que la onda lumínica. Veía, por ejemplo, que las manecillas del reloj parecían inmóviles, puesto que no hay otras ondas de luz que puedan alcanzar el reloj hasta que la velocidad disminuya.

es tan sencilla. Supongamos que la silla en que estás sentado se halla en un avión y la persona que pasa a tu lado es la azafata. Suponte que yo, desde el suelo, os estoy observando a los dos. Desde tu punto de vista tú estás quieto, y la azafata se mueve; pero desde mi punto de vista yo estoy inmóvil y vosotros dos os movéis. Todo depende de nuestro marco de referencia. Tu marco de referencia es el avión, pero mi marco de referencia es la tierra.

De Wit, como es normal, ha descubierto el problema de manera exacta. Pero por desgracia no lo resuelve. La tierra no puede considerarse inmóvil. No sólo gira sobre su eje, como un trompo, sino que ella y la luna giran en torno a un centro de gravedad común, mientras que ambos giran en derredor del sol a una velocidad de unos treinta kilómetros por segundo.

—Eso no es jugar limpio — decimos —. Desde luego es cierto, pero la tierra no parece moverse para nosotros, los que vivimos en ella. Sólo estará en movimiento si cambiamos nuestro marco de referencia de ella al sol. Si continuamos con ese juego, resultará imposible, de todo punto, encontrar en todo el universo algo que esté realmente quieto. Desde el punto de vista de la galaxia, el sol se mueve; desde el punto de vista de otra galaxia, nuestra galaxia se mueve; desde el punto de vista de una tercera galaxia, las dos galaxias anteriores se mueven. De hecho, desde el punto de vista de cualquier galaxia las otras se mueven.

—Muy bien explicado — se ríe Jim de Wit — y ésa es exactamente la cuestión. No hay nada que pueda considerarse en descanso absoluto, en inequívoca inmovilidad. El movimiento, o la falta de éste, es algo siempre relativo con cualquier otra cosa. El que nos estemos movimiendo o no depende del marco de referencia que estemos usando.

Este discurso *no* es la teoría especial de relatividad. De hecho es parte del principio de relatividad de Galileo, que cuenta ya con trescientos años de antigüedad. Toda teoría física es una teoría de relatividad si, como Jim de Wit, reconoce que existe la dificultad de detectar el movimiento absoluto o la inmovilidad absoluta. Una teoría de relatividad supone que el único tipo de movimiento que podemos determinar es movimiento — o falta de él — en relación con cualquier otra cosa. El principio de relatividad de Galileo dice, además, que las leyes de la mecánica son igualmente válidas dentro de todos los marcos de referencia (los físicos dirían «sistema de coordenadas») que se mueven de manera uniforme en relación a los otros.

El principio de relatividad de Galileo supone que en algún lugar del universo existe un marco de referencia en el cual las leyes de la mecánica son completamente válidas, es decir, un marco de referencia en el cual el experimento y la teoría concuerden perfectamente. Este marco de referencia es llamado un marco de referencia «inercial», lo que quiere decir simplemente un marco de referencia en el cual las leyes de la mecánica son completamente válidas. Todos los demás marcos de referencia que se mue-

ven uniformemente en relación con el marco de referencia inercial, son también marcos de referencia inerciales. Dado que las leyes de la mecánica son igualmente válidas en todo marco de referencia, esto significa que no hay forma de que podamos distinguir entre un marco de referencia inercial y otro realizando experimentos mecánicos en ellos.

Marcos de referencia que se mueven uniformemente unos en relación con otros, son sistemas de coordenadas que se mueven con una velocidad y una dirección constantes. En otras palabras, existen marcos de referencia que se mueven con una velocidad constante. Por ejemplo, si por accidente dejamos caer un libro desde una estantería, el libro cae directamente al suelo de acuerdo con la ley de la gravedad de Newton y golpea el suelo en la vertical debajo del lugar en que se hallaba antes de caer. Nuestro marco de referencia es la tierra. La tierra se mueve a una velocidad fantástica en su viaje alrededor del sol y esta velocidad es constante.*

Si dejamos caer el libro mientras vamos viajando en un suave tren ideal que se mueve a una velocidad constante, ocurre lo mismo. El libro cae directamente hacia abajo, siguiendo la ley de la gravedad de Newton y golpeará el suelo del tren exactamente debajo del lugar en el que estaba. En esta ocasión nuestro marco de referencia es el tren. Dado que el tren se mueve de manera uniforme, sin aumento o disminución de su velocidad en relación con la tierra, y porque la tierra está moviéndose de manera similar en relación al tren, los dos marcos de referencia se mueven uniformemente en relación uno con otro. Por consiguiente, las leyes de la mecánica son válidas en ambos. No tiene la menor importancia cuál de los dos sistemas de referencia se está «moviendo».

Una persona en cualquiera de los dos marcos de referencia puede considerar que él se está moviendo y que el otro marco de referencia está inmóvil (la tierra está inmóvil y es el tren el que se mueve o a la recíproca). Desde el punto de vista de la física no existe diferencia alguna.

¿Qué ocurre si el maquinista acelera el tren de manera repentina mientras estamos realizando nuestro experimento? Inmediatamente todo se altera. El libro que cae lo hará contra el suelo del tren pero un poco más atrás, puesto que el suelo del tren se ha movido hacia delante mientras el libro estaba cayendo. En ese caso el tren no se está moviendo uniformemente en relación con la tierra y el principio de la relatividad de Galileo no puede aplicarse.

Partiendo de la base de que todo el movimiento participante sea relativamente uniforme podemos trasladar el movimiento percibido en nuestro marco de referencia a otro marco de referencia. Por ejemplo, supongamos que estamos en la playa observando un buque que se mueve a treinta millas por hora. El buque es un marco de referencia moviéndose de manera uniforme con respecto a nosotros. Supongamos a un pasajero que está

* Aunque no lo experimentemos directamente, el movimiento orbital de la tierra se está acelerando.

de pie en la cubierta del barco, apoyado en la borda. Puesto que está quieto su velocidad es la misma que la del buque, treinta millas por hora. (Desde su punto de vista seremos nosotros los que nos estamos moviendo con relación *a él* a treinta millas por hora.)

Supongamos, ahora, que el hombre comienza a andar y se dirige hacia la proa del buque a tres millas por hora. Ahora su velocidad relativa para nosotros es de treinta y tres millas por hora. El buque lo lleva a treinta millas por hora y su marcha de tres millas, que se añaden a la velocidad inicial. (Se llega antes al final de una escalera automática en movimiento cuando en vez de esperar quieto se sube por ella.)

Supongamos, de nuevo, que el hombre se da la vuelta y se dirige hacia la popa, es decir, la parte de atrás del barco. Su velocidad relativa para con el barco será también tres millas hora, pero su velocidad relativa con la orilla desde donde observamos será de veintisiete millas por hora.

En otras palabras, para averiguar a qué velocidad se mueve el pasajero con relación a nosotros, tenemos que añadir su velocidad a la velocidad de su sistema de coordenadas (el buque) si camina en la misma dirección que éste, y substraer su velocidad de la de su sistema de coordenadas si camina en dirección opuesta. Este cálculo se llama una transformación clásica (galileana). Conociendo el movimiento relativo uniforme de dos marcos de referencia podemos transformar la velocidad del pasajero en relación con su propio sistema de cooordenadas (tres millas por hora) en su velocidad en relación con nuestro sistema de coordenadas (treinta y tres millas por hora).

La carretera ofrece abundantes ejemplos de transformaciones clásicas de un marco de referencia a otro. Supongamos que conducimos a ciento veinte kilómetros por hora. Vemos un camión que se aproxima a nosotros. Su cuenta velocidades marca la misma velocidad que el nuestro. Realizando una transformación clásica podemos ver que con relación a nosotros el camión se aproxima a 240 kilómetros por hora, lo que explica la razón por la cual los choques de frente suelen ser fatales con tanta frecuencia.

Supongamos ahora que un coche va en la misma dirección que nosotros. Su velocidad es de doscientos kilómetros a la hora (es un Ferrari). De nuevo, mediante la transformación clásica podemos calcular que su velocidad con relación a nosotros es de ochenta kilómetros por hora.

Las leyes de transformación de la mecánica clásica son de sentido común. Nos dicen que aunque no podamos saber si un marco de referencia está absolutamente inmóvil o no lo está, podemos trasladar velocidades — y posiciones — de un marco de referencia a otro, partiendo de la base de que los marcos de referencia se estén moviendo de manera uniforme entre ellos. Más aún, las transformaciones de Galileo vienen a decir que las leyes de la mecánica en relación con un marco de referencia son válidas en otro marco de referencia que se mueva de manera uniforme en relación con él.

Desgraciadamente hay una pega en todo esto. ¡Nadie ha encontrado to-

davía un sistema de coordenadas en el cual las leyes de la mecánica sean válidas! *

—¿Qué...? ¡Imposible! — protestamos —. ¿Qué pasa con la tierra?

Bien, es cierto que Galileo, que fue el primero en aplicar las leyes de la mecánica, utilizó la tierra como marco de referencia, aun cuando no fuera de manera consciente. (La idea de un sistema de coordenadas no se impuso hasta Descartes.) Sin embargo, nuestros actuales sistemas de medida son más exactos que los de la época de Galileo que, en ocasiones, incluso llegó a utilizar su pulso (¡lo que significa que mientras mayor excitación le produjera un experimento más inexacta sería su medida!) Cuando reconstruimos los experimentos de Galileo con la caída de los cuerpos, encontramos siempre discrepancias entre los resultados teóricos que debíamos obtener y los resultados experimentales que en la práctica conseguimos. Estas discrepancias se deben al movimiento de rotación de la tierra. La amarga verdad es que las leyes de la mecánica no son válidas para un sistema de coordenadas rígidamente unido a la tierra. La tierra *no* es un marco de referencia inercial. Desde su mismo principio las pobres leyes de la mecánica clásica se quedaron, por decirlo así, sin hogar. Nadie ha descubierto un sistema de coordenadas en el cual estas leyes se manifiesten perfectamente.

Desde el punto de vista del físico, esto nos deja metidos en un gran embrollo. Por un lado contamos con las leyes de la mecánica clásica que resultan indispensables para la física; pero por el otro esas leyes están destinadas a actuar en un sistema de coordenadas que ni siquiera existe.

Este problema está relacionado con la relatividad: el problema de determinar el no-movimiento absoluto de manera cercana, directa. Si se lograra detectar eso que se llama no-movimiento absoluto, en ese caso un sistema inercial relacionado con él podría ser el tan buscado — y, hace mucho tiempo, perdido — sistema de coordenadas en el cual las leyes clásicas de la mecánica serían perfectamente válidas. Todo volvería a tener sentido de nuevo porque dado un marco de referencia en el cual las leyes de la mecánica son válidas, *cualquier* marco de referencia, las leyes clásicas de la mecánica tendrían, por decirlo así, una dirección permanente a la cual dirigirles la correspondencia.

Los físicos no gustan de las teorías con cabos sueltos. Antes de Einstein, el problema de detectar el movimiento absoluto (o el reposo absoluto: si encontramos el uno encontraremos al otro también) y el problema de encontrar un sistema de coordenadas inercial eran cabos sueltos, cuando menos. La completa estructura de la mecánica clásica estaba basada en el hecho de que en algún lugar y de algún modo, tenía que haber un marco de referencia en el cual las leyes clásicas de la mecánica fueran válidas. La falta de habilidad de los físicos para dar con él hizo que la mecánica clásica adquiriera el aspecto de un enorme castillo... ¡de arena!

* Las estrellas fijas ofrecen tal marco de referencia, en tanto que definen la no-rotación.

Nadie, ni siquiera Einstein, pudo descubrir el reposo absoluto, y esta incapacidad de los físicos fue la mayor preocupación en los días de Einstein. La segunda controversia importante, en esos mismos días (sin contar el descubrimiento del quanto de Planck), era una característica de la luz incomprensible y que desafiaba a la lógica.

En el transcurso de sus experimentos con la velocidad de la luz, los físicos descubrieron algo muy extraño. La velocidad de la luz no toma en consideración las leyes de transformación de la mecánica clásica. Desde luego, esto es imposible, pero, experimento tras experimento probaron que era así, que el imposible se realizaba. La velocidad de la luz resulta ser la cosa más desprovista de sentido, más insensata, de todo lo descubierto. Y eso es porque nunca cambia.

—Bien, la luz viaja siempre a la misma velocidad — preguntamos —, ¿qué hay de extraño en ello?

—¡Vaya, vaya! — dijo un físico distraído, allá por 1887 —, sencillamente no entendéis el problema. El problema está en que, independientemente del movimiento del observador, la velocidad de la luz es siempre de 300.000 kilómetros por segundo (aproximadamente).*

—¿Y eso es algo malo? — preguntamos sintiendo la sospecha de que en esto puede haber algo extraño.

—Peor — responde el físico —. Es algo imposible. Mirad — nos cuenta mientras trata de calmarse —, supongamos que estamos quietos y que en algún lugar, frente a nosotros, hay una bombilla que también está inmóvil. La lámpara se enciende y se apaga intermitentemente y medimos la velocidad de la luz que llega a nosotros. ¿Cuál creéis que es esa velocidad?

—Trescientos mil kilómetros por segundo — respondemos —, que es la velocidad de la luz.

—¡Muy bien! — nos dice el físico con un brillo en su mirada que hace que nos sintamos incómodos —. Ahora supongamos que la bombilla sigue fija pero nosotros nos desplazamos hacia ella a una velocidad de cien mil kilómetros por segundo. ¿Cuál será la cifra que obtendremos al medir la velocidad con que la luz se acerca a nosotros?

—400.000 kilómetros por segundo. La velocidad de la luz (300.000 kilómetros por segundo), más nuestra velocidad de desplazamiento hacia la luz (100.000 kilómetros por segundo).

(Se trata de un ejemplo típico de la transformación clásica.)

—¡Falso! — exclama el físico —. Ésa es exactamente la cuestión. *La velocidad con que la luz se acerca a nosotros sigue siendo de 300.000 kilómetros por segundo.*

* En el vacío. En la materia la velocidad de la luz cambia, de acuerdo con el índice de refracción de la materia: $C_{\text{materia}} = \frac{C}{\text{índice de refracción}}$.

—¡Espere un momento! — decimos —. Eso no puede ser. ¿Nos dice usted que si la bombilla, la fuente de luz, está quieta y nosotros también, la velocidad de los fotones emitidos por la fuente de luz medirá lo mismo, con relación a nosotros, que la velocidad de los fotones emitidos por la luz cuando nosotros corremos para acercarnos a la fuente de luz? Eso no tiene sentido. Cuando los fotones son emitidos viajan a 300.000 kilómetros por segundo. Si nosotros nos acercamos rápidamente a ellos su velocidad debe dar una medida mayor. En realidad debe aparecer como viajando a la velocidad con que son emitidos *más* nuestra velocidad. En nuestro ejemplo su velocidad debía ser de 300.000 kilómetros por segundo, más 100.000 kilómetros por segundo, que es la velocidad con la que nosotros nos aproximamos a los fotones.

—¡Ciertamente! — responde nuestro amigo el físico —. Pero no es así. Sigue siendo de 300.000 kilómetros por segundo, igual que si estuviéramos inmóviles.

Tras una pausa de meditación, como para que la idea penetre en nosotros, continúa:

—Ahora consideremos la situación opuesta. Supongamos que la bombilla emisora de la luz sigue quieta y que en el momento de lanzar su rayo nos estamos alejando de ella a una velocidad de 100.000 kilómetros por segundo. ¿Cuál debe ser la medida de la velocidad de los fotones?

—200.000 kilómetros por segundo — decimos llenos de confianba —, la velocidad de la luz menos la velocidad con que nos estamos alejando de los fotones que se aproximan a nosotros.

—¡Otra vez falso! — exclama de nuevo nuestro amigo —. Debía ser así, pero no lo es. La velocidad de los fotones seguirá midiendo 300.000 kilómetros por segundo.

—Cuesta mucho trabajo creerlo. ¿Quiere decir que si un foco de luz está inmóvil y medimos la velocidad de los fotones emitidos por él mientras nosotros estamos parados, después medimos la velocidad de los fotones cuando nosotros nos movemos en dirección a ellos y, por último, su velocidad cuando nos movemos en dirección opuesta a ellos, siempre obtendremos *el mismo resultado,* en los tres casos?*

* La situación inversa (la fuente de luz se mueve y el observador sigue estacionario) es explicable en términos de la física pre-relativista. De hecho, si aceptamos que la luz es un fenómeno ondulatorio, gobernado por una ecuación de onda, puede esperarse que su velocidad sea independiente de la velocidad de su fuente. La velocidad de las ondas de sonido que nos llegan procedentes de un avión a reacción no dependen de la velocidad del avión. Se propagan por un medio (la atmósfera) a una velocidad dada a partir de su punto de origen, independientemente de la velocidad del avión. (La *frecuencia* del sonido varía cuando la fuente productora se mueve [efecto de Doppler].) La teoría pre-relativista presumía la existencia de un medio en el cual las ondas se propagaban (la atmósfera para el sonido o el éter para la luz). La paradoja es que la velocidad de la luz al ser medida (experimento de Michelson-Morley) resultó ser independiente del movimiento del observador. En otras palabras, suponiendo que una onda de luz se propagara a través de un medio, ¿cómo podemos movernos nosotros por ese mismo medio, hacia la onda lumínica que se aproxima, sin incrementar su velocidad?

—¡Exactamente! — dice el físico —. 300.000 kilómetros por segundo.

—¿Hay pruebas de ello? — preguntamos.

—Desgraciadamente las hay. Dos físicos norteamericanos, Albert Michelson y Edward Morley, acaban de completar, recientemente, un experimento que parece probar que la velocidad de la luz es constante, independientemente del estado de movimiento del observador. Es algo que no puede suceder, pero que *sucede*. Algo carente de sentido. Una insensatez.

El problema del reposo (no movimiento) absoluto y el problema de la constancia de la velocidad de la luz, convergían en el experimento de Michelson-Morley (1887) que fue un experimento realmente crucial. Un experimento crucial es aquel que determina la vida o la muerte de una teoría científica. La teoría que estaba siendo investigada por Michelson-Morley era la teoría del éter.

La teoría del éter era que el universo entero estaba envuelto y totalmente permeado por una sustancia invisible, inodora, insabora que no tenía ninguna propiedad en absoluto y que existía, simplemente, porque tenía que existir para que las ondas de luz tuvieran un medio en el que propagarse. Para que la luz viajara como ondas tenía que haber algo que se ondulara. Ese algo era el éter. La teoría del éter fue el último intento de explicar el universo explicando alguna *cosa*. La explicación del universo en término de cosas (como la idea de la Gran Máquina) fue la característica distintiva de ese punto de vista mecánico que lo significó todo para la física, desde Newton hasta mediados del siglo XIX.

El éter, de acuerdo con esa teoría, estaba en todas partes y en todas las cosas. Vivíamos y realizábamos nuestros experimentos en un océano de éter. Para el éter, la más dura y sólida de las sustancias era tan porosa como una esponja para el agua. No hay puertas para el éter. Aunque nosotros nos movemos y vivimos en un mar de éter, este mar de éter no se mueve. Está, absolutamente, inequívocamente, en reposo.

Por consiguiente, aunque la razón primaria para la existencia del éter era el ofrecer a la luz algo con lo cual propagarse, su existencia resolvía, también, el viejo problema de localizar el sistema de coordenadas inercial original, el marco de referencia en el cual las leyes de la mecánica resultaban completamente válidas. Si el éter existía (y *tenía* que existir), el sistema de coordenadas unido a él era el sistema de coordenadas con respecto al cual todos los demás podrían ser comparados, tanto si estaban en movimiento o no.

Los hallazgos de Michelson y Morley dieron un veredicto mortal contra la teoría del éter.* Otra cosa igualmente importante es que pusieron los cimientos matemáticos de la nueva teoría revolucionaria de Einstein.

La idea de Michelson-Morley era la de determinar el movimiento de la tierra a través del mar de éter. El problema estaba en cómo hacerlo. Dos

* La teoría cuántica de campos produjo la resurrección de un nuevo tipo de éter: las partículas eran estados excitados del estado fundamental del campo (el estado vacío). El estado vacío es tan carente de características y tiene una simetría tan elevada que no podemos asignarle, experimentalmente, ninguna velocidad.

barcos en alta mar pueden determinar su posición relativa entre sí, pero si uno de ellos se mueve solo por un mar en absoluta calma no tiene un punto de referencia con el cual medir su desplazamiento. En los días pasados, los marinos arrojaban un madero pesado al mar y medían su avance con relación a él. Michelson y Morley hicieron lo mismo, pero el madero que utilizaron fue un rayo de luz.

Su experimento era, conceptualmente, sencillo e ingenioso. Si la tierra se mueve, razonaron, y el mar de éter está inmóvil en ese caso el movimiento de la tierra por el océano de éter causaría una ligera brisa de éter. Por tanto, un rayo de luz viajando en contra la brisa de éter debería tener una velocidad menor que un rayo de luz enviado a favor de la brisa de éter. Éste, en esencia, fue el experimento de Michelson y Morley.

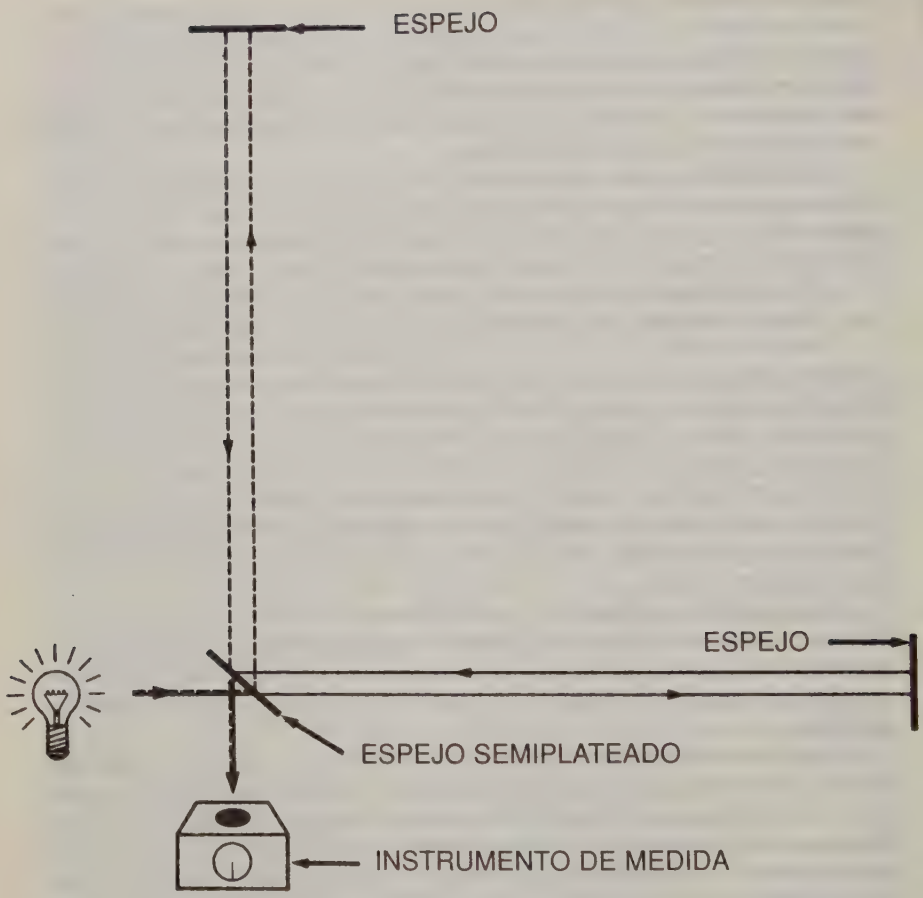
Cada piloto sabe que se necesita más tiempo para realizar un vuelo de distancia determinada si se viaja en contra del viento en uno de los trayectos (aun cuando en el viaje de vuelta se tenga el viento de cola) que cuando se realiza el viaje de sesgo, de costado, con un viento semejante. Lo mismo pensaron Michelson y Morley. Si la teoría del mar de éter era correcta, un rayo de luz enviado corriente arriba contra la brisa de éter y corriente abajo después, tardaría más tiempo en volver a su punto de partida que un rayo de luz enviado hacia adelante y hacia atrás perpendicular a la brisa de éter.

Para establecer y determinar esta diferencia de velocidad, Michelson y Morley crearon un instrumento llamado interferómetro (de la palabra «interferencia»). Estaba destinado a detectar los patrones de interferencia creados por los dos rayos de luz cuando regresaban al común punto de partida.

Una fuente de luz emite un rayo de luz hacia un espejo semiplateado (semejante a esas gafas de sol que parecen un espejo por un lado, pero son transparentes por el otro). El rayo de luz original es dividido en dos segmentos, cada uno de los cuales recorrera igual distancia, pero en ángulo recto entre sí, y regresarán de nuevo tras ser reflejados en dos espejos. Los dos rayos se reúnen a su regreso al pasar a través del mismo espejo semiplateado y siguen hacia un instrumento de medida. Observando la interferencia creada por esos dos rayos convergentes en el instrumento de medida, cualquier diferencia de velocidad entre ellos podría ser determinada con exactitud.

Cuando se realizó el experimento no se apreció la menor diferencia de velocidad entre los dos rayos de luz. El interferómetro fue girado noventa grados, de manera que el rayo que iba antes contra el viento de éter, en la nueva posición fuese de través y el rayo que antes iba de través ahora fuera en contra. De nuevo no se apreció la menor diferencia de velocidad entre los dos rayos.

En otras palabras, el experimento de Michelson y Morley no logró demostrar la existencia del éter. En tanto que no se encontrara una explicación para ello, los físicos se vieron obligados a enfrentarse con la elección entre dos incómodas alternativas (1) la tierra no se mueve (y Copér-



nico estaba equivocado) o (2) el éter no existe. Ninguna de esas dos posibilidades resultaba verdaderamente aceptable.

Michelson y Morley pensaron que era posible que la tierra arrastrara una capa de éter consigo al moverse a través del mar de éter, del mismo modo que arrastra consigo a la atmósfera cuando viaja a través del espacio y, por consiguiente, en las cercanías de la superficie terrestre la brisa no podía ser detectada. Nadie tenía una mejor hipótesis. Hasta que un irlandés llamado George Francis Fitzgerald, propuso (en 1892) una explicación escandalosa.

Fitzgerald razonó que era posible que la presión del éter comprimiera a la materia de la misma forma que un objeto elástico que se mueve a través del agua se acorta en la dirección de su desplazamiento. En ese caso, el brazo del interferómetro apuntando en dirección al viento del éter sería

algo más corto que el brazo en ángulo recto con él. Por tanto, una reducción de la velocidad de la luz que viajaba de frente al viento de éter, en ese brazo, podría no ser apreciada debido a que la distancia que tenía que correr la luz era también menor. De hecho, si la cantidad en la cual era acortado el brazo del interferómetro situado de cara al viento de éter se correspondía con la cantidad en que se disminuía la velocidad de la luz, viajando (ida y vuelta) por ese brazo, ambos rayos de luz en el experimento alcanzarían el instrumento de medición exactamente al mismo tiempo. (El rayo con mayor velocidad recorría una distancia mayor en el mismo tiempo que el rayo con velocidad menor recorría una distancia menor.)

La hipótesis de Fitzgerald tenía una importante ventaja sobre las demás: era imposible probar que no fuera cierta. Venía a decir, simplemente, que había una contracción unidimensional (en la dirección del movimiento) que crecía a medida que decrecía la velocidad. La clave está en que *todo* se contrae. Si queremos medir la longitud de un objeto que se mueve a muy grandes velocidades, comparables a la de la luz, lo primero que tenemos que hacer es ponerlo a nuestro alcance y, cuando lo hacemos — de acuerdo con la teoría — el instrumento que utilizamos para la medida, que llevamos con nosotros, también se habría contraído. Si el objeto medía medio metro en posición de reposo también mediría medio metro a esas altas velocidades. Nada parecerá contraído porque las lentes de nuestros ojos también se habrán contraído lo suficiente para hacer que todo nos parezca completamente normal.

Un año más tarde, un físico holandés, Hendrik Antoon Lorentz, mientras analizaba otro problema independiente llegó a la misma hipótesis. Sin embargo, Lorentz expresó su descubrimiento en rigurosos términos matemáticos. Esto, desde luego, elevó la hipótesis de Fitzgerald hasta una posición de respetabilidad y comenzó a ganar un sorprendente grado de aceptación, si se tiene en cuenta lo mucho de fantástico que hay en ella. Las formulaciones matemáticas de la contracción de Fitzgerald-Lorentz pasaron a ser conocidas como las transformaciones de Lorentz.

El escenario estaba establecido. Toda la escenificación en su lugar. El fallo en detectar la existencia del éter. El experimento de Michelson-Morley.* La constancia de la velocidad de la luz. Las contracciones de Fitzgerald-Lorentz. Las transformaciones de Lorentz. Ésos eran los hechos que continuaban confundiendo a los físicos a comienzo de siglo. A todos ellos menos a Albert Einstein. Cuando observó todos los componentes de la escenificación, lo que su mente de principiante vio fue la teoría especial de la relatividad.

* Se ha dicho que el proceso de razonamiento mediante el cual Einstein descubrió la teoría especial de la relatividad no incluye los resultados del experimento de Michelson-Morley. Sin embargo, los resultados de ese experimento que gozó de tanta publicidad estuvieron «en el aire» durante dieciocho años antes de que Einstein publicara su escrito sobre la teoría especial de la relatividad (1905) y condujo a las transformaciones de Lorentz, que se convirtieron en punto central del formalismo matemático de la relatividad especial.

INSENSATEZ ESPECIAL

El primer acto de Einstein, después de revisar los hechos, fue el equivalente a decir: «¡Pero si el emperador no lleva ropa alguna!», excepto que lo que él realmente dijo fue: «El éter no existe.»[1] El primer mensaje de la teoría especial de la relatividad fue que, puesto que el éter no puede ser detectado y es, en efecto, carente de toda utilidad, no había razón alguna para seguir buscándolo. Resultaba imposible de detectar porque todos los intentos de medirlo o de determinar su cualidad, que culminaron con el experimento de Michelson-Morley, fallaron estrepitosamente en sus intenciones de indicar su presencia. Carece de utilidad porque la propagación de la luz puede ser explicada como propagación de energía a través del *espacio vacío (in vacuo)*, de acuerdo con la ecuación de los campos de Maxwell, en tanto pueda ser considerada como una perturbación del medio éter. Einstein declaró claramente lo que ya estaba implícito en las ecuaciones de Maxwell (Maxwell fue el descubridor del campo electromagnético).

«Los campos electromagnéticos — escribió — no son estados de un medio (el éter) ni dependen de ningún otro agente, sino que son realidades independientes que no pueden ser reducidas a ninguna otra cosa...»[2] Esta afirmación se veía apoyada por la incapacidad de los físicos de detectar el éter.

Con su declaración, Einstein puso fin, en la ilustre historia de la mecánica, a la idea de que los sucesos físicos son explicables en términos de cosas. La mecánica clásica es la historia de los objetos y las fuerzas que actúan entre ellos. Significó una notable ruptura con una tradición de trescientos años el afirmar tan claramente, a principios del siglo XX, que los campos electromagnéticos no implicaban ningún tipo de objetos, que no eran estados del medio, del éter, sino «realidades últimas e irreducibles»[3] en sí mismas. Por consiguiente, como en la mecánica cuántica, tampoco en este terreno podía haber representaciones concretas asociadas a su teoría física.

La relatividad y la teoría del quanto proclamaban un alejamiento sin precedentes de la experiencia, que era lo que hasta entonces había caracterizado a la teoría física. De hecho esa tendencia aún continúa en vigor.

Como pensamiento gobernador por una inexorable ley, la física está haciéndose más y más abstracta y se aleja cada vez más de la experiencia. Sólo el futuro puede decir si esta tendencia es reversible.

La segunda víctima de la incapacidad de Einstein de ver las ropas del emperador, que no existían, fue el reposo absoluto. ¿Por qué debemos conceder *privilegios*[4] a un particular marco de referencia, con respecto a otros, diciendo que éste está en absoluto reposo? Podría resultar deseable teóricamente, pero como ese marco de referencia no constituía una parte de nuestra experiencia debía prescindirse de él. Resultaba «intolerable»[5] situar en una estructura teórica una característica que no tiene característica correspondiente en nuestro sistema de experiencia.

De un golpe, Einstein eliminó dos de los más importantes obstáculos físicos y filosóficos que se oponían en el camino radicalmente nuevo de percibir la realidad. Sin el éter y sin el concepto del movimiento absoluto para confundir la situación, ésta se hacía mucho más simple.

El siguiente paso de Einstein fue enfrentarse al rompecabezas que se había presentado, con respecto a la luz, en el experimento de Michelson-Morley, es decir, la constancia de la velocidad de la luz. ¿Cómo podía ser que la velocidad de la luz fuera *siempre* de 300.000 kilómetros por segundo independientemente del estado de movimiento del observador?

¡Con un ingenioso cambio de dirección, Einstein transformó este rompecabezas en un postulado! Por el momento, en vez de preocuparse de cómo era posible algo así, aceptó el hecho, experimentalmente irrefutable, de que *ocurría* así. Este reconocimiento evidente (para nosotros) de lo obvio, fue el primer paso en un proceso lógico que, una vez puesto en movimiento, iba a explicar no sólo el misterio de la velocidad constante de la luz sino muchas cosas más.

El misterio de la constancia de la velocidad de la luz se convirtió, gracias a Einstein, en el principio de la constancia de la velocidad de la luz. Y este principio, a su vez, es la primera piedra en los cimientos de la teoría de la relatividad especial.

El principio de la constancia de la velocidad de la luz es que, con independencia de dónde y cómo hacemos la medición de la velocidad de la luz, si estamos en movimiento o en reposo con relación a la fuente de luz, siempre obtendremos el mismo resultado. La velocidad de la luz es, invariablemente, de 300.000 kilómetros por segundo. Esto es lo que Michelson y Morley descubrieron en su famoso experimento.

Desde el punto de vista de la mecánica clásica, el principio de la constancia de la velocidad de la luz no tiene sentido en absoluto. De hecho, entra violentamente en conflicto con el sentido común. Antes de Einstein, el control totalitario del «sentido común» elevó la constancia de la velocidad de la luz a la categoría de paradoja. (Dondequiera que se intenta saltar sobre los límites de nuestra realidad cognoscitiva autoimpuesta, el resultado es siempre paradójico.) Se necesita una mente de principiante pura, como la de Albert Einstein, para aceptar que lo que es, es (la constancia

de la velocidad de la luz), y, en ese caso, *el sentido común tiene que estar equivocado.*

La víctima más importante de la mente de principiante de Einstein fue la total estructura de las transformaciones clásicas (de Galileo), ese dulce pero ilusorio fruto de un sentido común anclado en macroscópicas dimensiones y velocidades. Renunciar al sentido común no es una tarea fácil. Einstein fue el primero en hacerlo de una manera tan completa que su percepción de la verdadera naturaleza de espacio y tiempo cambió de manera radical. Pero lo que es más, cuando todo eso quedó dicho y hecho, resultó que la visión de Einstein sobre espacio y tiempo era mucho más útil que la del sentido común.

La segunda piedra angular de la teoría especial de la relatividad, es el principio de la relatividad. Cuando Einstein apartó de sí la idea de la existencia del reposo, o no-movimiento, absoluto, su teoría se convirtió *ipso facto* en una teoría de la relatividad. Dado que no se disponía de un mejor principio de relatividad que tomar en préstamo que el de Galileo, Einstein, sencillamente, recurrió a él. Pero antes lo actualizó acomodándolo a los nuevos tiempos.

El principio de la relatividad de Galileo dice que las leyes de la dinámica (como por ejemplo las leyes que rigen la caída de los cuerpos) que son válidas en un marco de referencia son válidas en todos los marcos de referencia que se mueven uniformemente (sin aceleración) en relación con él. Otra forma de decir lo mismo es que es imposible de determinar, realizando experimentos relacionados con las leyes de la mecánica, si nuestro marco de referencia se está moviendo o está en reposo en relación con otro marco de referencia en el cual las leyes de la mecánica también son válidas.

Einstein extendió el principio de la relatividad de Galileo para incluir en él *todas* las leyes de la física y no solamente las leyes de la mecánica clásica. En particular incluyó las leyes que rigen la radiación electromagnética, que era desconocida en los tiempos de Galileo.

El principio de relatividad actualizado por Einstein decía que todas las leyes de la naturaleza eran exactamente iguales en todos los marcos de referencia que se movieran uniformemente en relación entre sí y que, por tanto, no había forma de distinguir el movimiento absolutamente uniforme (o el reposo).

En resumen las dos piedras angulares de la teoría especial de la relatividad son: el principio de la constancia de la velocidad de la luz (el experimento de Michelson-Morley) y el principio de la relatividad (Galileo). Dicho de manera más específica, la teoría especial de la relatividad descansa en estos dos postulados:

(1) La velocidad de la luz en el vacío es la misma en todos los marcos de referencia (para todos los observadores) que se mueven uniformemente en relación unos con otros, y

(2) Todas las leyes de la naturaleza son las mismas en todos los mar-

cos de referencia que se mueven uniformemente unos en relación con los otros.

De estos dos postulados, el primero es el que causa más problemas. No hay manera de conseguir que él y las leyes de transformación puedan ser ciertos simultáneamente. De acuerdo con las leyes de transformación clásicas (y con el sentido común) la velocidad de la luz tiene que ser la velocidad con la que es emitida por una fuente lumínica más, o menos, la velocidad del observador si éste se está moviendo en dirección a la fuente o alejándose de ella. De acuerdo con la experiencia, la velocidad de la luz permanece constante, independientemente del estado de movimiento del observador. El sentido común y los resultados experimentales en este caso están en violento desacuerdo.

Su mente de principiante le decía, a Einstein, que puesto que no se puede discutir *lo que es* (las pruebas experimentales) eso quería decir que nuestro sentido común tenía que estar equivocado. Con esta decisión de dejar a un lado el sentido común y basar su nueva teoría en los únicos vestidos que podía ver que lucía el emperador (la constante velocidad de la luz y el principio de relatividad) Einstein penetró audazmente en lo desconocido, de hecho en lo inimaginable. Una vez en el interior de ese nuevo territorio, procedió a explorar donde hasta entonces no lo había hecho persona alguna.

¿Cómo es posible que para todo espectador la velocidad de la luz sea la misma independientemente de su estado de movimiento? Para medir la velocidad hace falta utilizar una regla (una vara rígida) y un reloj. Si la velocidad de la luz tal y como es medida por un observador, que está en reposo relativo con una fuente de luz, es la misma que la medida por un observador en movimiento relativo con la fuente, tiene que ser porque, de un modo u otro, los *instrumentos de medida* cambian, de un marco de referencia a otro, de modo que la velocidad de la luz siempre parece la misma.

La velocidad de la luz parece ser constante porque las reglas y los relojes que utilizamos para medirla varían de un marco de referencia a otro, en función de su *movimiento*. En resumen, para un observador en reposo una regla en movimiento cambia su longitud y un reloj en movimiento cambia su ritmo. Al mismo tiempo, para un observador viajando con una regla y un reloj en movimiento, no hay cambio aparente en la longitud y en el ritmo. Por consiguiente, ambos observadores al medir la luz obtienen el resultado de que es la misma y nadie puede detectar algo no usual en la medición ni en los aparatos de medición.

Esto es algo muy parecido al caso del experimento Michelson-Morley. De acuerdo con Fitzgerald y Lorentz, el brazo del interferómetro que está de cara al viento del éter (que ahora hemos eliminado de nuestra teoría) es acortado por la presión del viento del éter. Y así la luz que viaja por el brazo del interferómetro que se enfrenta al «viento del éter» tiene que recorrer una distancia menor y más tiempo para hacerlo que la luz que viaja por el otro brazo. Como resultado, la velocidad de la luz que se des-

plaza en ambos brazos aparece como la misma. Esto es lo que describe las transformaciones de Lorenz. Si se piensa a fondo, *las transformaciones de Lorentz pueden ser utilizadas para describir contracciones debidas al movimiento* lo mismo que contracciones debidas a un ficticio viento de éter.

Fitzgerald y Lorentz imaginaban que las reglas (varillas) rígidas eran comprimidas por la presión del viento del éter, pero de acuerdo con Einstein es el *movimiento en sí* el que causa la contracción y, además, la dilatación del tiempo.

Hay otra forma de mirar el asunto. Una «velocidad de la luz constante» es exactamente lo que resultaría si las reglas rígidas de medición se hicieran más cortas y los relojes más lentos; eso sería debido a que un observador en movimiento mediría la luz con una regla de medición más corta (menos distancia que recorrer para la luz) y un reloj más lento (más tiempo para hacer el viaje) que un viajero en estado de reposo. Cada observador consideraría su propia regla y su propio reloj como normales e inalterados. En consecuencia, ambos observadores obtendrían el mismo resultado de 300.000 kilómetros por segundo y ambos se sentirían intrigados por este hecho si siguieran atados a las leyes de la transformación clásica.

Éstos fueron los frutos iniciales de las afirmaciones básicas de Einstein (el principio de la constancia de la velocidad de la luz y el principio de la relatividad): primero, un objeto en movimiento se contrae en la dirección en la dirección de su movimiento y se hace más corto a medida que su velocidad se incrementa, hasta que, al alcanzar la velocidad de la luz, desaparece por completo. Segundo, un reloj en movimiento anda más despacio que un reloj en reposo y continúa haciendo su marcha cada vez más lenta a medida que aumenta la velocidad hasta que, al alcanzar la velocidad de la luz, deja de andar por completo.

Esos efectos sólo serán aparentes a un observador «estacionario», en relación con el reloj y la regla en movimiento. No serán aparentes para el observador que viaje con la regla y el reloj. Para aclarar esto, Einstein introdujo la clasificación de «propio» y «relativo». Lo que vemos cuando observamos nuestra regla y nuestro reloj estacionarios, si también nosotros estamos en estado estacionario, es su longitud *propia* y su tiempo *propio*. Lo que vemos si nosotros estamos en estado estacionario y observamos una regla y un reloj viajando a velocidades muy altas en relación con nosotros, es la longitud *relativa* y el tiempo *relativo* de la regla y el reloj en movimiento. La longitud relativa es siempre menor que la propia y el tiempo relativo es siempre más lento que el propio.

El tiempo que uno observa en su propio reloj es su tiempo propio y el tiempo que se ve en el reloj de una persona que se mueve muy rápidamente, en relación con uno, es el tiempo relativo (que resulta para el observador — no para la persona que pasa en movimiento — ser más corto). Desde el punto de vista de la persona que pasa moviéndose en relación con el espectador, éste se está moviendo y la situación se invierte.

Supongamos que vamos a bordo de una nave espacial en un viaje de exploración. Nos hemos puesto de acuerdo en apretar un botón cada quince minutos para enviar una señal de vuelta a la tierra. A medida que la velocidad de nuestra nave espacial aumenta, nuestros observadores en la tierra se darán cuenta de que en vez de cada quince minutos nuestras señales empiezan a llegar con intervalos de diecisiete minutos y después de veinticuatro minutos. Al cabo de varios días nuestros colegas en la tierra, con desesperación, se encontrarán con que nuestras señales les llegan cada dos días. Si nuestra velocidad continúa en aumento nuestras señales llegarán con intervalos de años. Podrá ocurrir que entre una y otra señal transcurran generaciones de terráqueos.

Mientras tanto, a bordo de la nave espacial, nosotros estamos totalmente ignorantes de lo que está sucediendo en la tierra. En lo que a nosotros respecta todo se está desarrollando con arreglo al plan previsto y nosotros nos vamos aburriendo, poco a poco, con la rutina de tener que apretar el botón cada quince minutos. Cuando regresamos a la tierra, pocos años más viejos (nuestro tiempo propio) nos encontramos con que, de acuerdo con el tiempo de la tierra, hemos estado fuera de la tierra durante siglos (su tiempo relativo). Exactamente cuántos años o siglos hayan pasado dependerá de lo elevadas que sean las velocidades que hayamos conseguido en nuestro viaje.

Esta descripción no es de ciencia-ficción. Está basada en un fenómeno bien conocido (de los físicos) llamado la Paradoja de los Gemelos, de la teoría de la relatividad especial. Parte de la paradoja es que aquel de los gemelos que se queda en la tierra (mientras que el otro va en una astronave para realizar un viaje espacial) será más viejo que su hermano cuando el viajero regrese a la tierra.

Hay muchos ejemplos de tiempo propio y tiempo relativo. Supongamos que estamos en una estación espacial observando a un astronauta que está viajando por el espacio a una velocidad de 250.000 kilómetros por segundo en relación con nosotros. Al observarlo notaremos cierta lentitud en sus movimientos como si se moviera a cámara lenta. También notaremos que todo en su nave espacial parece moverse del mismo modo. Su cigarrillo durará, por ejemplo, el doble que el nuestro.

Desde luego, parte de esta lentitud se debe al hecho de que está incrementando, muy rápidamente, la distancia que lo separa de nosotros y, a cada momento que pasa, la luz de su nave espacial tarda más tiempo en llegar a nosotros. Sin embargo, aun después de descontar ese tiempo, relacionado con el viaje de la luz desde la nave espacial hasta nosotros, seguiremos observando que el astronauta se sigue moviendo más lentamente de lo normal.

Pero para el astronauta en cuestión somos nosotros los que nos estamos moviendo en relación con él, a una velocidad de 250.000 kilómetros por segundo, y una vez que él haya hecho todos los descuentos necesarios, se encontrará con que nuestros movimientos son más lentos. Nuestro cigarrillo dura el doble que el suyo.

Esta situación puede ser la ilustración definitiva de cómo la hierba es siempre más verde en el otro lado. El cigarrillo de cada uno de los dos hombres dura el doble de tiempo que el del otro. (Desgraciadamente, eso mismo ocurre con la visita de cada hombre al dentista.)

El tiempo que nosotros mismos experimentamos y medimos es nuestro tiempo propio. El tiempo que medimos del astronauta es el tiempo relativo. Su cigarrillo dura dos veces más que el nuestro porque su tiempo transcurre de manera dos veces más lenta que el nuestro. La situación es semejante en lo que respecta a las longitudes propia y relativa. Desde nuestro punto de vista, el cigarrillo del astronauta (suponiendo que su punta esté orientada en la dirección en que se mueve la nave espacial) será más corto que nuestro propio cigarrillo.

El otro lado de la moneda es que el astronauta se ve a sí mismo como en estado estacionario y su cigarrillo le parece normal. También nos ve a nosotros como si estuviéramos viajando a 250.000 kilómetros por segundo, en relación con él, y nuestros cigarrillos más cortos y de combustión más lenta.

La teoría de Einstein ha sido comprobada de distintos modos y todos ellos verifican sus postulados con pavorosa exactitud.

Las verificaciones más comunes del fenómeno de la dilatación del tiempo provienen de la física de las partículas de alta energía. Una partícula muy ligera, llamada *muon,* se crea en la parte superior de la atmósfera terrestre por la colisión de protones (una forma de «radiación cósmica») con las moléculas del aire. Sabemos, gracias a experimentos con muones creados en aceleradores, que los muones viven un tiempo muy corto. Nunca el suficiente para poder llegar a la tierra desde la atmósfera superior. Mucho antes de que transcurra el tiempo que necesitan para atravesar esa distancia se desintegran espontáneamente y se transforman en otros tipos de partículas. Sin embargo, esto no ocurre así, puesto que los detectamos en abundancia aquí, en la superficie de la tierra.

¿Por qué los muones creados por las radiaciones cósmicas viven, de hecho, *siete veces más* que los creados en un laboratorio? La respuesta es que los muones producidos por los choques de las radiaciones cósmicas en el aire viajan a una velocidad mucho mayor que los creados experimentalmente. A esas velocidades el efecto de la dilatación del tiempo es claramente apreciable. Esos muones no viven más de lo corriente desde *su* punto de vista, pero desde nuestra perspectiva viven siete veces más de lo que lo harían a velocidades menores.

Eso es cierto no sólo para los muones sino para casi todas las partículas subatómicas y hay muchos tipos de ellas. Por ejemplo, los piones, otro tipo de partícula subatómica, que se desplazan al 80 por ciento de la velocidad de la luz, por término medio, y que viven un 1,67 veces más que los piones a velocidades lentas. La teoría especial de la relatividad nos dice que el tiempo de vida intrínseco de esas partículas de alta velocidad no se incrementa, sino que su ritmo relativo de tiempo transcurre con mayor lentitud. La teoría especial de la relatividad hizo posible el cálculo de

esos fenómenos mucho antes de que tuviéramos la capacidad técnica de crearlos experimentalmente.

En 1972, cuatro de nuestros más exactos relojes atómicos disponibles en la actualidad fueron puestos a bordo de un avión y dieron en él la vuelta al mundo. Al final del viaje se descubrió que se habían retrasado ligeramente en relación con sus semejantes que quedaron estacionarios en tierra con los cuales fueron sincronizados antes de emprender el vuelo.* La próxima vez que emprendamos un vuelo debemos recordar que — aunque en muy pequeño grado — nuestro reloj andará más despacio, nuestro cuerpo tendrá una mayor masa y, si vamos sentados mirando hacia la cabina del piloto, adelgazaremos un poco.

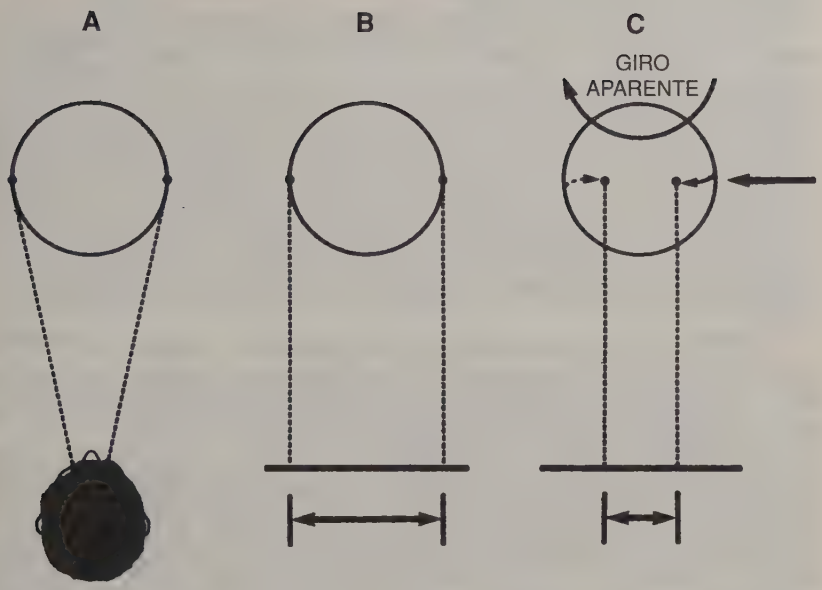
La famosa parábola de la cueva, de Platón, nos describe a un grupo de personas encadenadas dentro de una caverna de tal modo que solamente pueden ver las sombras que se reflejan en la pared de la caverna. Esas sombras eran el único mundo conocido para aquellas personas. Un buen día una de ellas logra escapar al mundo exterior, fuera de la cueva. Al principio quedó cegado, deslumbrado por el sol, pero cuando se recuperó se dio cuenta de que *aquél* era el mundo real y que lo que con anterioridad había tomado por el mundo auténtico no era, realmente, más que la proyección de las sombras del mundo auténtico sobre la pared de la caverna. (Desgraciadamente, cuando regresó a la caverna, junto a los demás que habían quedado encadenados en ella, y les contó lo que había visto fuera, los demás creyeron que se había vuelto loco.)

De acuerdo con la teoría especial de la relatividad, un objeto en movimiento parece contraerse en la dirección del movimiento a medida que su velocidad se va incrementando. Janes Terrell, otro físico, ha demostrado matemáticamente que este fenómeno es, solamente, algo parecido a una ilusión visual y, en realidad, tiene una completa analogía con la proyección del mundo real en el muro de la cueva, en la parábola de Platón.[6]

La figura A representa una perspectiva hacia abajo desde la parte alta de nuestra cabeza a la parte superior de una esfera. Las líneas conectan nuestros ojos con puntos situados a ambos lados de la esfera. Si estamos lo suficientemente alejados de la esfera, la distancia entre ambos puntos es casi igual al diámetro de la esfera. La figura A ha sido dibujada como si el dibujante hubiera contemplado nuestros ojos y la esfera desde encima de nuestra cabeza.

El primer paso en la explicación de Terrell es trazar líneas hacia abajo (véase la figura), desde cada uno de los dos puntos de la esfera hacia una pantalla situada exactamente debajo de ella. La figura B es una perspectiva lateral, mostrando los dos puntos, las líneas trazadas hacia abajo y la pan-

* Los relojes dieron la vuelta al mundo en ambas direcciones (volando hacia el Este y volando hacia el Oeste). Se apreciaron en ellos tanto los efectos de la relatividad general como los de la relatividad especial. (J. C. Hafele y R. E. Keating, *Science*, vol. 172, 1972, págs. 166 y siguientes.)



talla. (Si el lector coloca el libro directamente frente a él, sus ojos estarán en la misma posición relativa a las líneas de puntos que los ojos dibujados en la figura A.)

Para entender la explicación de Terrell, supongamos que la esfera se está moviendo con mucha rapidez, a velocidad próxima a la de la luz, de derecha a izquierda. Si la esfera se mueve con la suficiente rapidez ocurren cosas sumamente interesantes. Por ejemplo, antes de que la luz procedente del punto situado en el borde izquierdo pueda haber alcanzado al observador, la esfera se coloca frente a ella, bloqueando su trayectoria, ¡y la luz no llega a nuestra visión! Lo contrario ocurre con el lado derecho. La esfera se aleja del camino entre el observador y las señales lumínicas originadas por puntos que estaban en la parte de «atrás» de la esfera. Esas señales se hacen visibles para el observador, mientras que las señales procedentes del punto que estaba al borde de la esfera ahora quedan bloqueadas por la propia esfera en su movimiento hacia la izquierda. El efecto de esto es una ilusión de engaño. ¡Lo que vemos es lo mismo que veríamos si alguien hubiera hecho *girar* la esfera en torno a su eje!

Veamos lo que le ocurre a la distancia entre los dos puntos al ser proyectados sobre la pantalla. Es considerablemente menor que al comienzo del experimento. La ecuación en la teoría especial de la relatividad (las transformaciones de Lorentz), que describe una contracción debida al movimiento, describe igualmente esas *proyecciones*. (¿No empieza esto a pa-

recerse a la caverna de Platón?)

El hecho de que la esfera, al moverse tan rápidamente, intercepte el camino de algunas de sus propias señales de luz y se aparte del camino de otras, causa el efecto ilusorio de que la esfera está girando. Eso hace que la distancia *proyectada* entre dos puntos cualesquiera en la esfera que estén alineados en dirección al movimiento, disminuya. Exactamente como si alguien girara la esfera. Mientras más de prisa se mueva la esfera, más rápido parecerá su *giro* y más próximos estarán los dos puntos proyectados en la pantalla. Es decir, que la proyección *es* la que se contrae. En lugar de «pantalla», pongamos «punto de vista de la esfera desde nuestro marco de referencia» y tendremos la explicación de Terrell de la contracción relativista.

Todavía no se ha encontrado ningúna explicación análoga para la dilatación del tiempo que acompaña a los relojes en movimiento, ni tampoco para el aumento de la masa que se produce en los objetos en movimiento, pero la búsqueda, relativamente hablando, todavía es joven.

La teoría especial de la relatividad muestra que la masa de un objeto en movimiento se incrementa cuando se incrementa la velocidad del objeto. Newton no hubiera vacilado en calificar a eso de insensatez, pero la experiencia de Newton estaba limitada a velocidades que son muy pequeñas en comparación con la velocidad de la luz. La física clásica nos dice que se requiere una determinada cantidad de fuerza para aumentar la velocidad de un objeto en movimiento en una cantidad determinada, por ejemplo, un metro por segundo. Una vez que sabemos qué aumento de fuerza se requiere para conseguir el aumento de la velocidad de ese determinado objeto en un metro por segundo, todo lo que necesitamos es aplicar sobre él esa cantidad de fuerza. Si el objeto tiene una velocidad de 100 metros por segundo y le aplicamos esa determinada cantidad de fuerza su velocidad pasará a ser de 101 metros por segundo. De acuerdo con la física de Newton la misma cantidad de fuerza que aumenta la velocidad de 100 metros por segundo a 101 metros por segundo, incrementaría la velocidad de un objeto que se mueve a 8.000 metros por segundo a 8.001 metros por segundo.

El problema estriba en que la física newtoniana está en un error. Se necesita más fuerza para incrementar en un metro por segundo la velocidad de un objeto que se mueve a 8.000 metros por segundo que para el mismo objeto moviéndose a 100 metros por segundo.

Esto se debe a que un objeto que se mueve más rápidamente, tiene mayor energía cinética (energía de movimiento). La energía adicional hace que se comporte como si poseyera mayor masa. Una determinada cantidad de fuerza aplicada durante un determinado tiempo a un solo vagón aumentará mucho más la velocidad de éste que si la aplicamos a un tren entero para incrementar la velocidad del tren entero. Está claro que esto se debe a que el tren completo tiene una masa mayor que la de un vagón solo.

Cuando las partículas se mueven a velocidades que pueden considerarse rápidas en relación con la velocidad de la luz, su elevada energía cinética

hace que éstas se comporten como si tuvieran mayor masa de la que tienen a bajas velocidades. Lo cierto es que la teoría especial de la relatividad nos muestra que la masa efectiva de un objeto en movimiento *aumenta* con la velocidad.

Dado que la mayor parte de las partículas subatómicas se desplazan a distintas velocidades, cada una de ellas puede tener diferentes masas relativas. Por consiguiente, los físicos han calculado la «masa en reposo» de cada partícula. La masa en reposo es la masa de la partícula cuando no se mueve. Las partículas subatómicas, en realidad, nunca están en reposo, pero así se ofrece un método uniforme para comparar sus masas. Esto es necesario puesto que cuando la velocidad de una partícula se aproxima a la velocidad de la luz, su masa relativa depende de la rapidez con que se está desplazando.

El descubrimiento de Einstein de que los relojes en movimiento cambian su ritmo de marcha lleva a algunas revisiones espectaculares en el modo como vemos el mundo. Nos muestra que no hay un tiempo «universal» que sea válido en todo el universo. Sólo hay tiempos propios asociados a distintos observadores. El tiempo propio de cada observador es distinto, excepto en el caso de que dos de ellos estén en reposo relativo entre sí (uno con el otro). Si el universo tuviera un latido cardiaco su ritmo dependería de quién lo estuviera escuchando.

La teoría especial de la relatividad nos muestra que dos sucesos que ocurren de manera simultánea en un marco de referencia pueden aparecer como si ocurrieran en tiempos distintos, si son vistos desde otro marco de referencia. Para aclarar este punto, Einstein utilizó uno de sus famosos experimentos conceptuales.

Un experimento conceptual es un ejercicio mental. Tiene la ventaja de que no requiere otro instrumental salvo la mente, lo cual lo libera de las limitaciones de los experimentos de laboratorio. La mayor parte de los físicos aceptan el uso de experimentos conceptuales como herramienta teóricamente válida, partiendo de la base de que se den por satisfechos con la idea de que si el experimento pudiera ser efectuado prácticamente sus resultados serían realmente los mismos del experimento conceptual o mental.

Supongamos que nos encontramos en una habitación en movimiento y que la habitación se mueve a velocidad uniforme. Exactamente en el centro de la habitación hay una bombilla que lanza destellos de luz periódicamente. La habitación tiene paredes de cristal, de manera que un observador desde fuera puede contemplar lo que ocurre dentro.

En el momento en que pasamos en nuestro desplazamiento junto a un observador exterior, la luz produce un destello. La pregunta es si habrá alguna diferencia entre lo que nosotros vemos dentro de la habitación que se mueve (nosotros nos movemos con ella) y lo que ve el observador que se encuentra fuera de ella. De acuerdo con la teoría especial de la relatividad la respuesta es: en efecto, *sí,* hay diferencia. Una gran diferencia.

Dentro de la habitación nosotros vemos como la luz se expande en todas direcciones a la misma velocidad. Dado que las paredes del recinto, transparentes, son equidistantes de la bombilla nosotros vemos que la luz incide de manera simultánea en la pared delantera (en dirección de la marcha) y la posterior.

El observador exterior ve el destello y también cómo la luz se propaga en todas direcciones a la misma velocidad. Sin embargo, además de esto, ve que la habitación se está moviendo. Desde su punto de vista la pared delantera trata de escapar a la luz que se aproxima a ella, mientras que la pared posterior corre a su encuentro. En consecuencia, para el observador externo la luz alcanza la pared trasera un poco antes que la pared delantera. Por poca que sea la diferencia, lo cierto es que la luz llega a ambas paredes en un orden dado, pero no al mismo tiempo.

Es decir, que aunque ambos observamos los mismos dos acontecimientos (la luz incidiendo sobre la pared delantera y la luz chocando con la pared trasera), cada uno de nosotros tendría una distinta versión que contar de ellos. Para nosotros, dentro de la habitación, los dos acontecimientos son simultáneos. Para el observador externo uno de los acontecimientos ocurre primero y el otro después.

El descubrimiento revolucionario de Einstein fue que los acontecimientos que son simultáneos para un observador podrían ocurrir en tiempos distintos para otros, dependiendo ello de sus movimientos relativos. Dicho de otro modo: dos acontecimientos, uno de los cuales ocurre antes y el otro después, vistos desde un marco de referencia de un observador, podrían ocurrir simultáneamente vistos desde el marco de referencia de otro observador. Uno de los observadores utilizará las palabras «antes» y »después». El otro la palabra «simultáneo» pese a que ambos observadores están describiendo los mismos dos acontecimientos.

En otras palabras, «antes», «después» y «simultáneos» son términos locales. No tienen validez en el universo en toda su amplitud, salvo que estén unidos a un determinado marco de referencia. Lo que es «antes» en un marco de referencia puede ser «después» en el otro marco de referencia y ambos términos se unirán con el de «simultáneo» en un tercero.*

Las fórmulas matemáticas que traducen lo que ve un observador en un marco de referencia a lo que un observador ve en otro marco de referencia, son las transformaciones de Lorentz. Einstein adoptó las transformaciones de Lorentz — que son una serie de ecuaciones — de manera virtualmente intacta.

Nadie antes de Einstein consiguió unos resultados tan asombrosos, con ese sencillo tipo de experimento conceptual, porque nadie antes que Ein-

* Esto es solamente cierto para acontecimientos que están espacialmente separados. Para acontecimientos separados en el tiempo, la relación antes y después queda preservada para todos los observadores. Los sucesos separados en el tiempo nunca pueden aparecer como simultáneos en ningún marco de referencia que se mueva con una velocidad menor que *c* (la velocidad de la luz). La separación espacial es explicada posteriormente.

stein tuvo la audacia de postular algo tan fantástico como el principio de la constancia de la velocidad de la luz y nadie se atrevió a ello, porque el principio de la constancia de la velocidad de la luz se contradice de manera completa e inequívoca con el sentido común; especialmente con el sentido común tal y como estaba representado por las leyes clásicas de la transformación. Estas leyes están impregnadas de sentido común y, al mismo tiempo, tan integradas en nuestra existencia cotidiana que a nadie, verdaderamente, se le ocurrió ponerlas en duda.

Incluso después de que el experimento de Michelson y Morley produjo resultados que eran de todo punto incompatibles con las leyes clásicas de transformación, ninguna otra mente de principiante más que la de Einstein concibió la idea de que las leyes clásicas de transformación pudieran estar equivocadas. Solamente a Einstein se le ocurrió sospechar que a velocidades muy altas, mucho más rápidas que aquellas que estamos en condiciones de comprobar con nuestros sentidos, las citadas leyes no eran aplicables. Esto no equivale a afirmar que sean incorrectas. A bajas velocidades (en comparación con los 300.000 kilómetros por segundo de la luz), la contracción y la dilatación del tiempo no son apreciables sensorialmente. En esa situación limitada, las transformaciones clásicas son una buena guía para la experiencia práctica. Al fin y al cabo, en una escalera automática en marcha realmente llegaremos antes a su final si además caminamos hacia delante.

Si realizamos el experimento de la habitación en movimiento con el sonido, en vez de con la luz, no obtendremos confirmación de la teoría especial de la relatividad, sino de las leyes clásicas de transformación. El principio de la constancia de la velocidad de la luz no existe en el sonido, porque su velocidad no es constante. Varía de acuerdo con el movimiento del observador (oidor), tal y como dicta el sentido común. La palabra aquí es precisamente ésa: «dicta».

Vivimos nuestras vidas en una situación limitada de bajas velocidades, donde la velocidad del sonido (1.200 km hora aproximadamente) nos parece «rápida». Por consiguiente, nuestro sentido común está basado en nuestras experiencias en este limitado ambiente. Si deseamos extender nuestra comprensión más allá de esas limitaciones, es necesario rehacer nuestras construcciones conceptuales. Eso es lo que hizo Einstein, que fue la primera persona en ver que era esto, precisamente, lo que había que hacer para dar sentido a determinados resultados experimentales imposibles a todas luces, como la constancia de la velocidad de la luz para cualquier observador, independientemente de su estado de reposo o movimiento.

Esto le llevó a convertir la constancia de la velocidad de luz de un misterio en un principio, lo que, a su vez, le condujo a la conclusión de que si la velocidad de la luz era constante para todos los observadores en distintos estados de movimiento, los instrumentos de medición usados por ellos, en sus distintos estados de movimiento, tenían que variar pues de no ser así no podían dar resultados semejantes. Con un golpe de suerte, Einstein descubrió que las mismas variantes habían sido expresadas ya en las

ecuaciones del holandés Hendrik Lorentz, así que decidió tomarlas prestadas. Por último, el comprobar que los relojes cambiaban su marcha con el movimiento, lo arrastró a la inevitable conclusión de que «ahora», «antes» o «después», así como «simultáneo», no eran más que términos relativos. Todo dependía del estado de movimiento del observador.

Esta conclusión es, precisamente, la opuesta a los supuestos en los cuales se basa la física newtoniana. Newton, como hacíamos todos, supuso que había un reloj que contaba simultáneamente los segundos que transcurrían en todo el universo. A cada segundo de tiempo transcurrido en un determinado rincón del universo, se correspondía un segundo en el más apartado de sus extremos.

De acuerdo con Einstein esto no es correcto. ¿Cómo puede alguien decir cuando es «ahora» en todo el universo? Si queremos designar ese «ahora» por la concurrencia de dos acontecimientos simultáneos, como, por ejemplo, mi llegada a la consulta de mi médico y mi reloj que marca las tres en punto, nos encontraremos con que un observador situado en otro sistema de referencia verá que uno de esos dos acontecimientos se produce antes que el otro, es decir, que para él no son simultáneos. Newton escribió que el «tiempo absoluto transcurría de manera igual...»,[7] pero estaba equivocado. No hay un tiempo único que transcurra igual para todos los observadores. La realidad es que no existe el tiempo absoluto.

La existencia de un flujo de tiempo fundamental, último, que transcurría por todo el universo físico, cosa que todos habíamos aceptado tácitamente, resultó ser sólo una prenda más de los supuestos ropajes del emperador que éste no llevaba puestos.

A este respecto, Newton cometió, además, otro nuevo error. Afirmó que espacio y tiempo eran dos cosas separadas, lo que según Einstein no es así en absoluto. Nada puede ocurrir en determinado lugar sin ocurrir en un determinado tiempo, y nada puede ocurrir en el tiempo sin que suceda en un lugar.

La mayor parte de nosotros creemos que espacio y tiempo son cosas separadas porque ésa es la forma como pensamos al entrar en contacto experimental con ellos. Por ejemplo, vemos que tenemos la posibilidad de ejercer cierto control sobre nuestra posición en el espacio, pero que de ningún modo podemos controlar nuestra posición en el tiempo. No podemos hacer nada en absoluto para detener nuestro deslizarnos en el tiempo. Podemos elegir el quedarnos completamente inmóviles, en cuyo caso nuestra posición en el espacio no cambia, pero no hay forma de que podamos permanecer inmóviles en el tiempo.

Aparte de esto, hay algo que resulta muy difícil de captar, muy esquivo, al referirnos a los conceptos de «espacio» y, sobre todo, de «tiempo». Es algo que nos impide poder «calcular de manera anticipada, cuál será nuestra relación con ellos». Subjetivamente, el tiempo tiene una cualidad huidiza que se parece mucho a un arroyo en movimiento: algunas veces transcurre espumeante y agitado, cuando apresura su paso al discurrir en-

tre orillas próximas con un cauce angosto y poco profundo. Otras veces se hace lento, cuando el cauce es ancho y la pendiente escasa. En ciertas ocasiones hasta parece estacionarse y forma grandes balsas en las cuales el agua causa la impresión de estar inmóvil. También el espacio tiene una cualidad ubicua, lo que ha servido de base a la idea generalizada de que el movimiento sirve únicamente para separar cosas.

El famoso poema de William Blake trata de conseguir una definición próxima a esas cualidades intangibles:

> *«Para poder ver un Mundo en un grano de arena*
> *y un Cielo en una flor silvestre,*
> *abarca el Infinito con la palma de tu mano*
> *y la Eternidad en una hora.»*

(No es coincidencia que el título de este poema sea «Augurios de Inocencia».)

La teoría especial de la relatividad es una teoría física. Su objetivo es descubrir la naturaleza matemáticamente calculable de la realidad. *No* es una teoría de lo subjetivo. Aunque parece mostrar que las apariencias de la realidad física pueden variar de un marco de referencia a otro, es una teoría de los aspectos incambiables (los físicos dicen «invariables») de la realidad física. La teoría especial de la relatividad es la primera teoría rigurosamente matemática útil para la exploración de zonas cuya expresión, hasta entonces, había sido del dominio de los poetas. Como cualquier otra representación de la realidad concisa y aguzada, las teorías de la relatividad son poesía para los matemáticos y los físicos. Sin embargo, el renombre universal de Einstein es posible que se deba, en gran parte, a la intuición compartida de que tenía algo profundamente relevante que comunicar sobre el espacio y el tiempo.

Y exactamente lo que Einstein tenía que decir era que no existen cosas así como espacio *y* tiempo, sino únicamente espacio-tiempo. Espacio-tiempo es un continuo. Un continuo es algo cuyas partes están tan próximas entre sí, son tan «arbitrariamente pequeñas» que el continuo no puede ser roto en ellas; es decir, que estas partes no pueden separarse de entre sí. En un continuo no hay rupturas porque se desliza, transcurre, continuadamente.

Por ejemplo: un continuo unidimensional es una línea trazada en un muro. Teóricamente podemos decir que la línea está compuesta por una serie de puntos, pero los puntos están infinitamente cerca unos de otros. El resultado es que la línea transcurre continuadamente de un extremo al otro.

Un ejemplo de un continuo bidimensional es la pared. Cuenta con dos dimensiones, longitud y anchura. De manera similar todos los puntos de la superficie están en contacto estrecho entre sí y la pared es, en sí, una superficie continua.

Un continuo tridimensional es lo que comúnmente llamamos «espacio».

Un piloto que vuela en su avión navega en un continuo tridimensional. Para ofrecernos su posición no sólo tiene que decirnos su situación Norte y Este, por ejemplo, sino también su altura. El avión, como todas las cosas físicas, es tridimensional, tiene longitud, anchura y grosor. Ésa es la razón por la cual los matemáticos llaman a nuestra realidad (que es también su realidad) tridimensional.

De acuerdo con la física de Newton, nuestra realidad tridimensional está separada del tiempo y se mueve hacia adelante en un tiempo unidimensional. La teoría especial de la relatividad no lo expresa así. Según ella, nuestra realidad es *tetradimensional,* tiene cuatro dimensiones. Vivimos, respiramos y existimos en un continuo cuatridimensional de espacio-tiempo.

La perspectiva newtoniana de espacio y tiempo es una imagen *dinámica.* Los acontecimientos se van desarrollando con el transcurrir del tiempo. El tiempo es unidimensional y se *mueve* (hacia adelante). El pasado, el presente y el futuro transcurren en ese orden. La teoría especial de la relatividad, sin embargo, nos dice que es preferible y mucho más útil pensar en términos de una imagen *estática,* inmóvil, de espacio-tiempo. Eso constituye un continuo de espacio-tiempo. En esta imagen estática los sucesos no se desarrollan, no transcurren: simplemente *son.* Si pudiéramos contemplar nuestra realidad de manera tetradimensional podríamos ver que todo aquello que ya parece haberse desarrollado, haber sucedido antes que nosotros en el transcurrir del tiempo, sigue existiendo *in toto,* como si estuviera estampado en el tejido que constituye el continuo espacio-tiempo. Lo mismo sucede con lo que está por devenir. Podríamos verlo todo, el pasado, el presente y el futuro con sólo una mirada. Desde luego, esto es solamente una proposición matemática (¿o no es así?)

No hay razón para que nos preocupemos por no poder visualizar un mundo cuatridimensional. Tampoco los físicos pueden hacerlo. Lo único que está en sus manos, por el momento, es aceptar que es posible que Einstein tenga razón, puesto que las pruebas parecen indicarlo así. El mensaje de Einstein es que espacio y tiempo están relacionados de manera muy íntima. A falta de un mejor modo de expresarlo, nos representó esta relación llamando al tiempo una cuarta dimensión.

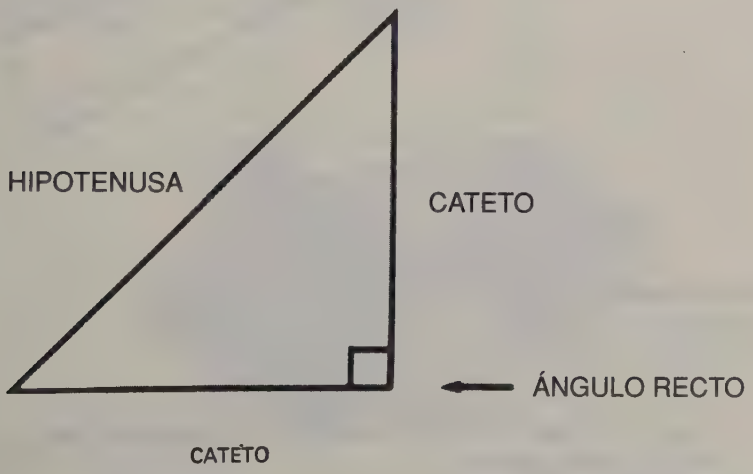
«Cuarta dimensión» es una traducción de un idioma a otro. El lenguaje original son las matemáticas y el segundo es, en este caso, el castellano. El problema está, simplemente, en que no hay forma de expresar en términos del segundo idioma lo que dice el primer idioma. Por consiguiente, el concepto de «tiempo como una cuarta dimensión» es, sencillamente, la etiqueta que hemos dado a una *relación.* La relación, en este caso, es la existente entre espacio y tiempo tal y como se expresa matemáticamente en las teorías de la relatividad.

La relación entre espacio y tiempo, descubierta por Einstein, es semejante a la relación existente entre los lados de un triángulo rectángulo, descubierta por el griego Pitágoras, un contemporáneo de Confucio, allá por el 550 a. de C.

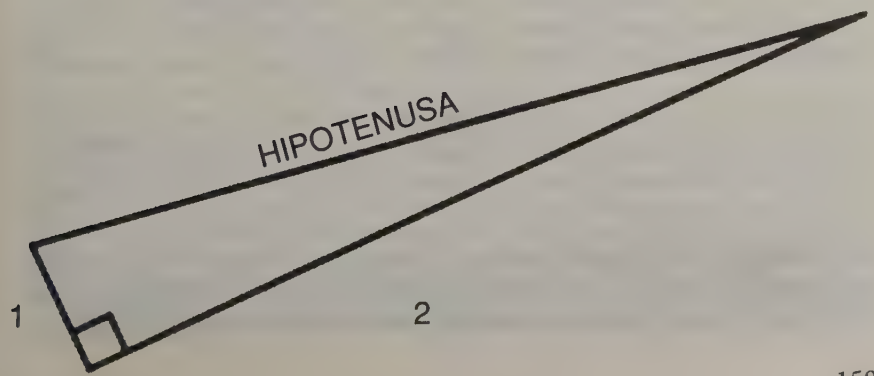
Un triángulo rectángulo es un triángulo que contiene un ángulo recto. Un ángulo recto es el que se forma cuando dos líneas perpendiculares se encuentran en un punto. El dibujo que sigue es el de un triángulo rectángulo. El lado opuesto al ángulo recto se llama hipotenusa. Este lado es siempre el de mayor longitud del triángulo rectángulo.

Pitágoras descubrió que siempre que conociéramos las longitudes de los dos lados pequeños podríamos calcular la del lado más largo. Esta relación expresada matemáticamente es el Teorema de Pitágoras: el cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los catetos (los lados más cortos).

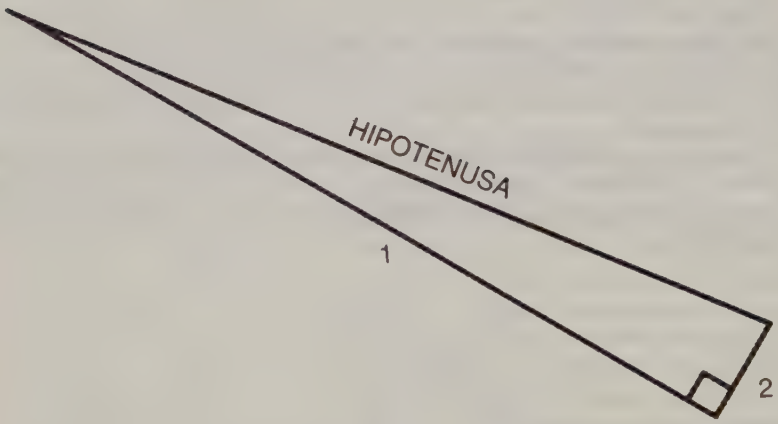
Es decir que una hipotenusa de una longitud determinada puede ser producto de diferentes combinaciones de catetos. Dicho de otro modo: hay muchas combinaciones de diferentes catetos que, calculadas, darán la misma hipotenusa.



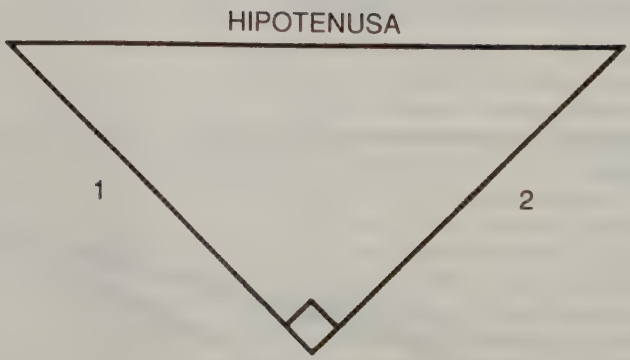
Por ejemplo, el primero de los catetos puede ser muy corto y el segundo muy largo.



O a la inversa.

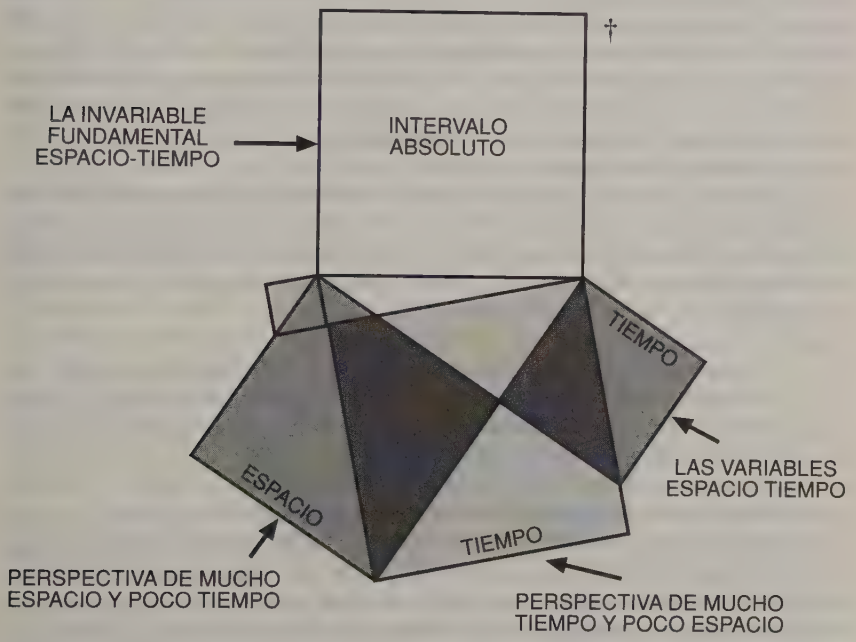


O algo intermedio.



Si sustituimos «espacio» por uno de los catetos de un triángulo rectángulo, «tiempo» por el otro cateto y llamamos «intervalo espacio-tiempo» a la hipotenusa, tenemos una relación que es conceptualmente análoga a

la relación entre espacio-tiempo con el intervalo espacio-tiempo descrito en la teoría especial de la relatividad.* El intervalo espacio-tiempo entre dos sucesos es un absoluto. Nunca varía. Puede parecer diferente a distintos observadores en distintos estados de movimiento, pero es siempre igual en sí mismo, invariable. La teoría especial de la relatividad nos muestra como diferentes observadores, en distintos marcos de referencia, pueden observar los mismos dos sucesos y calcular el intervalo espacio-tiempo entre ellos. La respuesta que todos los observadores obtendrán será la misma.



Un observador puede hallarse en un estado de movimiento tal que para él hay una distancia y un tiempo, en relación con dos sucesos, y otro observador puede estar en otro estado de movimiento tal que sus instru-

* El Teorema de Pitágoras es $C^2 = A^2 + B^2$. La ecuación para el intervalo espacio-tiempo en la teoría especial de la relatividad es $s^2 = t^2 - x^2$. El teorema de Pitágoras describe propiedades en el espacio euclidiano. La ecuación para el intervalo espacio-tiempo describe propiedades en el espacio-tiempo plano de Minkowski (el espacio euclidiano y no-euclidiano serán explicados en el capítulo próximo). Hay igualmente otras diferencias, pero la relación fundamental entre espacio, tiempo y el intervalo espacio-tiempo es muy semejante a la relación, expresada en el teorema de Pitágoras, entre los tres lados de un triángulo rectángulo.

** Gracias a Guy Murchie, que dibujó la versión original de este gráfico en su simpático libro *Music of Spheres*, Nueva York, Dover, 1961.

mentos de medida indican una distancia y un tiempo distinto entre los dos acontecimientos. Pero el intervalo espacio-tiempo entre los dos no varía. Por ejemplo: el intervalo espacio-tiempo, la absoluta separación entre dos astros en explosión es el mismo, tanto si es observado desde un marco de referencia que se mueve lentamente como un planeta, o desde un marco de referencia que se mueva con gran rapidez, como un cohete espacial de gran velocidad.

Permítasenos volver a nuestro experimento con la habitación móvil de paredes de cristal. Aun cuando nosotros, los que estamos en el interior de la habitación, vemos cómo la luz incide en el muro delantero y en el muro trasero de manera simultánea, el observador exterior verá que el rayo de luz incide sobre el muro posterior antes de alcanzar el anterior. Pero si utilizamos la ecuación semejante al Teorema de Pitágoras, en la cual tanto nosotros como el observador exterior sustituimos nuestras respectivas medidas de tiempo y distancia, ambos hallaremos el mismo intervalo espacio-tiempo entre ambos acontecimientos.

En realidad esta relación semejante al Teorema de Pitágoras fue el descubrimiento de uno de los profesores de matemáticas de Einstein, Hermann Minkowski, que se sintió inspirado por la teoría especial de la relatividad de su más famoso discípulo. En 1908, Minkowski anunció su opinión de este modo:

> «A partir de ahora el espacio en sí y el tiempo en sí, están condenados a desvanecerse, convertidos en simples sombras, y solamente una especie de unión entre los dos conservará una realidad independiente.»[8]

Las exploraciones matemáticas de Minkowski en el espacio y el tiempo, fueron, al mismo tiempo, fascinantes y revolucionarias. Como consecuencia de ellas surgió un sencillo diagrama de espacio-tiempo que mostraba la relación matemática existente entre el pasado, el presente y el futuro. De toda la gran riqueza de información contenida en ese diagrama, lo que más fuerte sensación causa es la de que todo el pasado y todo el futuro de cada ser individual se encuentran y se encontrarán siempre en un único punto, *ahora*. Y lo que es más: el *ahora* de cada ser individual está localizado específicamente y nunca se encontrará en ningún otro lugar que no sea *aquí* (allí donde se encuentre el observador).

Sesenta y tres años antes de que Ram Dass, en su gran libro *Be Here Now,* estableciera el lema de su movimiento de consciencia, Hermann Minkowski probó que en la realidad física no hay elección en la materia (¿insensatez?) Desgraciadamente para los físicos, la realización no siempre es la experiencia. No obstante, después de dos mil años de uso en el Oriente, el estar aquí ahora, el primer paso en la meditación, recibió su convalidación en la Ciencia Occidental por medio de la rigurosa confirmación matemática de Minkowski, inspirada en la teoría especial de la relatividad.

El último y más famoso aspecto de la teoría especial de la relatividad es su revelación de que la masa es una forma de energía y que la energía tiene masa. En palabras de Einstein: «la energía tiene masa y la masa representa energía».[9]

Aunque todo eso suena extraño en cierto sentido, en el sentido de que durante muchos años creímos que la materia era diferente de la energía del mismo modo que el cuerpo es diferente de la mente (otra forma de la misma teoría), en otro sentido suena sorprendentemente natural. La dicotomía materia-energía se remonta a un pasado muy lejano, al Antiguo Testamento. El Génesis nos presenta al hombre como una especie de creación cerámica. Dios tomó un puñado de barro (materia) y sopló la vida (energía) en el muñeco. El Antiguo Testamento es un producto del mundo occidental (o a la recíproca). La física es, también, un producto del mundo occidental.

Sin embargo, en el Este nunca hubo demasiada confusión filosófica o religiosa (solamente en Occidente estos dos conceptos están separados) sobre materia y energía. El mundo de la materia es un mundo relativo y un mundo ilusorio. Ilusorio, pero no en el sentido de que no exista, sino ilusorio en el sentido de que no lo vemos como es en realidad. El modo como es realmente no puede ser explicado en palabras, pero, en un intento de referirse a él la literatura oriental habla repetidamente de energía danzante y de formas transitorias y no permanentes. Esto tiene un parecido llamativo y emocionante con la imagen de la realidad física que surge de la física de las partículas de alta energía. La literatura budista no habla de aprender nuevas cosas relacionadas con la realidad, sino de ir eliminando los velos de la ignorancia que existen entre nosotros y lo que somos *ya* realmente. Quizá a esto se deba el que la absurda afirmación de que la masa es tan sólo una forma de energía resulte inesperadamente aceptable.

La fórmula que expresa la relación entre masa y energía es la fórmula más famosa del mundo: $E = mc^2$. La energía contenida en un trozo de materia es igual a su masa multiplicada por un número extraordinariamente grande, el cuadrado de la velocidad de la luz. Eso quiere decir que incluso la más pequeña partícula de materia posee una tremenda cantidad de energía concentrada en ella.

Aunque Einstein no lo sabía en aquel entonces, acababa de descubrir el secreto de la energía estelar. Las estrellas convierten de manera continuada materia en energía. Debido a lo grandísima que es la relación de conversión energía-materia consumida, las estrellas pueden continuar ardiendo durante innumerables milenios y milenios.

En el centro de la estrella, los átomos de hidrógeno, la materia primordial del mundo físico, están tan apretados entre sí, debido a la enorme fuerza gravitacional de la estrella, que se fusionan juntos dando lugar al nacimiento de un nuevo elemento, el helio. Cada cuatro átomos de hidrógeno se convierten en un átomo de helio. Sin embargo, la masa de un átomo de helio no es la misma de cuatro átomos de hidrógeno, sino ligeramente menor. Esta pequeña diferencia es emitida en forma de energía

radiante —luz y calor—. El proceso de fusionar elementos ligeros en otros más pesados se llama, naturalmente, fusión. La fusión del hidrógeno en helio causa una explosión de hidrógeno. En otras palabras, una estrella ardiente (joven) es, literalmente, una enorme bomba de hidrógeno en explosión continuada.

La fórmula $E = mc^2$, se confirma en la bomba atómica. Las bombas atómicas y los reactores atómicos obtienen energía de la masa por el procedimiento de la fisión, que es el opuesto a la fusión. En vez de fusionar pequeños átomos transformándolos en otros mayores, el procedimiento de fisión rompe los átomos de uranio, que son muy grandes y los transforma en otros más pequeños.

Esto se consigue bombardeando un átomo de uranio con una partícula subatómica, un neutrón. Cuando el neutrón golpea al átomo de uranio éste se rompe en otros átomos más pequeños. Como la masa de todos estos átomos resultantes reunida es menor que la masa del átomo original de uranio, la diferencia de masa explosiona y se transforma en energía. Este proceso produce, además, neutrones adicionales que vuelan para golpear a otros átomos de uranio, creando nuevas fisiones, más átomos ligeros, más energía y más neutrones. Este fenómeno, en su conjunto, es lo que se llama una reacción en cadena. Una bomba atómica es una reacción en cadena incontrolada.

Una bomba de hidrógeno (fusión) se produce mediante la detonación de una bomba atómica (fisión) en media de una cantidad de hidrógeno. El calor de la explosión atómica (en lugar del calor producido por la fricción causada por la gravedad) fusiona los átomos de hidrógeno en átomos de helio, produciendo más calor, y así sucesivamente. No hay límites en el tamaño de una potencial bomba de hidrógeno que, además se construye con el elemento más abundante del universo.

Para bien o para mal, uno de los descubrimientos más importantes de la teoría especial de la relatividad es que masa y energía son diferentes formas de la misma cosa. Al igual que espacio y tiempo no son entidades separadas. No hay diferencia cualitativa entre masa y energía, sólo existe masa-energía. Matemáticamente, este descubrimiento significa que las dos leyes de conservación de la masa y la energía, pueden ser sustituidas por una sola, la de conservación de masa-energía.

Una ley de conservación es, sencillamente, la declaración de que una cantidad de lo que quiera que sea nunca cambia, pase lo que pase. Por ejemplo, supongamos que existiera una ley de conservación que regulara el número de invitados en una fiesta. Si una cosa así fuera cierta, advertiríamos que cada vez que llegaba un nuevo invitado otro se marchaba y, asimismo, cada vez que uno se marchaba tenía que acudir uno nuevo. El ritmo de esta renovación de invitados podría ser mayor o menor y los invitados podrían llegar y marcharse solos o en grupos, pero en toda circunstancia, en cualquier momento, el número de invitados en la fiesta tendría que ser el mismo.

La ley de conservación referente a la energía dice que la cantidad total

de energía en el universo siempre fue y siempre será la misma. Podemos convertir una forma de energía en otra (como por ejemplo energía mecánica en energía térmica mediante la fricción), pero la cantidad total de energía presente en el universo no cambia nunca. Igualmente, la ley de conservación de la materia dice que la cantidad total de materia en el universo fue y siempre será la misma. Podemos convertir una materia en otra materia (como, por ejemplo, hielo en agua, o agua en vapor), pero la cantidad total de materia en el universo no cambiará nunca.

La teoría especial de la relatividad, al combinar masa y energía en masa-energía, combina la ley de conservación de la materia y la ley de conservación de la energía para formar la ley de conservación de masa-energía. Esta ley dice que la cantidad de masa-energía en el universo siempre fue y siempre será la misma. La masa podrá convertirse en energía y viceversa, pero la cantidad total de masa-energía en el universo no cambiará.

El sol, las estrellas e, incluso, la leña que arde en nuestra chimenea, son ejemplos de la masa que se convierte en energía. Los físicos que estudian las partículas subatómicas se han familiarizado de tal modo con el concepto de intercambio de masa en energía y de energía en masa que, de manera rutinaria, designan la masa de las partículas en términos de su contenido energético.

En términos generales existen solamente doce leyes de conservación, leyes sencillas que cada vez se van haciendo más importantes, especialmente dentro del campo de la física de las partículas de alta energía, porque se derivan de lo que los físicos creen ser los principios definitivos (la última danza) que gobiernan el mundo físico. Estos principios son las leyes de simetría.

Las leyes de simetría son con bastante rigurosidad lo que su nombre indica. Algo es simétrico si ciertos aspectos suyos siguen siendo los mismos bajo condiciones variables. Por ejemplo: un semicírculo siempre refleja a la otra mitad independientemente de por dónde cortemos el círculo. Independientemente de cómo giremos un círculo la mitad de la derecha siempre reflejará a la otra mitad. La posición del círculo cambia, pero su simetría permanece.

Los chinos tienen un concepto semejante (¿tal vez el mismo?) Una parte del círculo es llamada por ellos «yin» y la otra parte «yang». Mientras esté el yin estará el yang también. Donde haya muerte habrá nacimiento. El concepto del yin-yang, que realmente es una viejísima ley de simetría, es otra forma de decir que el universo es una totalidad que busca el equilibrio consigo misma.

La ironía de la teoría especial de la relatividad, como se nos ha presentado hasta ahora, es que no se ocupa de esos aspectos de la realidad que son relativos, sino de aquellos otros que no lo son. Al igual que el de la mecánica cuántica, el impacto de la teoría de la relatividad sobre la física de Newton ha sido demoledor. No solamente porque ha demostrado que

estaba equivocada sino, más aún, al poner al descubierto sus grandes limitaciones. La teoría especial de la relatividad y la física cuántica nos han catapultado a zonas amplísimas e inimaginables de la realidad, de las cuales no teníamos ideas previas.

Las suposiciones de la física de Newton corresponden a los inexistentes ropajes del emperador que siempre creíamos llevaba puestos: un tiempo universal cuyo transcurrir uniforme afectaba a todo el universo; un espacio independiente, separado y vacío. Y la creencia de que existía algún lugar del universo en calma, quietud e inmovilidad absolutas.

La teoría de la relatividad nos ha demostrado la falsedad (la falta de utilidad) de cada una de estas suposiciones. El emperador no vestía, en absoluto, ninguna de esas ropas. El único movimiento en el universo físico siempre es relativo a cualquier parte, aparte de él. No hay separación entre espacio y tiempo. Masa y energía son nombres distintos para una misma cosa.

En lugar de estas suposiciones de la física newtoniana, la teoría especial de la relatividad nos ofrece una física nueva y unificada. Las mediciones de distancia y duración pueden variar de un marco de referencia a otro, pero el intervalo espacio-tiempo entre dos sucesos nunca cambia.

Pese a todo esto, la teoría especial de la relatividad tiene un fallo. Se basa en una situación más bien poco común. La teoría especial de la relatividad sólo es aplicable a marcos de referencia que se mueven uniformemente unos en relación con los otros. Desgraciadamente la mayor parte del movimiento no es constante ni idealmente uniforme. En otras palabras, la teoría especial de la relatividad está basada en una idealización. Está limitada y requiere esa especial situación de movimiento uniforme. Ésa es la razón por la cual Einstein la llamó la teoría «especial» o restringida, de la relatividad.

La visión de Einstein fue edificar una física válida para *todos* los sistemas de referencia, como aquellos que se mueven con movimientos no uniformes (aceleración y desaceleración) entre sí. Su idea fue crear una física que pudiera describir todos los sucesos en *cualquier* sistema o marco de referencia, independientemente de cuál fuera su movimiento en relación con cualquier otro sistema de referencia.

En 1915, Einstein consiguió tener éxito en el logro de una completa generalización de su teoría especial. Llamó a esta consecución, la teoría general de la relatividad.

INSENSATEZ GENERAL

La teoría general de la relatividad nos demuestra que nuestras mentes siguen distintas reglas de las que rigen el mundo real. Una mente racional se basa en las impresiones que recibe desde sus limitadas perspectivas y forma estructuras que posteriormente puede aceptar o rechazar a voluntad.

Desde este punto de vista, con independencia de cómo funcione el mundo, esa mente racional sigue las reglas que se autoimpuso y trata de estampar sobre el mundo real su propia impronta, su versión y sus conceptos de «lo que tiene que ser».

Y eso continúa así hasta que surge una mente de principiante que grita:

«Esto no es correcto. "Lo que tenía que ser" no está ocurriendo en la realidad. He tratado una y otra vez de descubrir por qué sucede así y no como debía suceder. He forzado mi imaginación hasta el límite para conservar mi creencia de que las cosas "tenían que ser así". He llegado a un punto de ruptura. Ya no me queda más remedio que admitir que esa supuesta "necesidad", en la que había creído, no proviene en verdad del mundo real, sino de mi propia mente.»

Este párrafo narrativo no es una hipérbole poética, es una descripción concisa de la conclusión más importante de la teoría general de la relatividad y de los medios con que fue lograda. Esa perspectiva limitada es la perspectiva de nuestra racionalidad tridimensional y de nuestros puntos de vista sobre una pequeña parte del universo (la parte en la que hemos nacido). Las cosas que «tienen que ser» son las ideas de la geometría (las reglas que rigen las líneas rectas, los círculos, los triángulos, etc.). La mente de principiante fue la de Albert Einstein. La creencia largo tiempo mantenida era que esas reglas regían sin excepción la totalidad del universo. Lo que la mente de principiante de Einstein descubrió fue que eso es algo que tan sólo está en nuestras mentes.*

* El punto de vista que expresamos aquí no es que la geometría provenga de nuestra mente. Hay muchas geometrías posibles, como ya Riemann y Lobaschevsky nos mostraron antes de Einstein. Pero la geometría de que disponemos actualmente está determinada por la física. Y así, Euclides consideraba que la geometría estaba estrechamente ligada con la experiencia (definió la congruencia moviendo

Einstein descubrió que ciertas leyes geométricas sólo eran válidas en regiones limitadas del espacio. Esto las hace útiles dado que nuestra experiencia está limitada, físicamente, a pequeñas regiones del espacio, como nuestro sistema solar. Sin embargo, a medida que nuestra experiencia se expande, encontramos que resulta más y más difícil aplicar esas reglas a la entera extensión del universo.

Einstein fue la primera persona que vio que las reglas geométricas que sólo eran aplicables a una parte del universo vista desde una limitada perspectiva (como la nuestra), no eran universales. Esto le liberó y le permitió ver y considerar al universo de un modo como nadie lo había previsto anteriormente.

Lo que vio es el contenido de la teoría general de la relatividad.

Einstein no se ocupó, en modo alguno, de la naturaleza de nuestras mentes. Su interés se cifraba en la física. «Nuestra nueva idea — escribió — es sencilla: construir una física válida para todos los sistemas coordenados.»[1] El hecho de que para ilustrar algo importante lo hiciese con la forma como estructuramos nuestras percepciones indica una inevitable tendencia hacia la combinación de la física y la sicología.

¿Cómo llegó Einstein desde una teoría física a una declaración revolucionaria sobre geometría? ¿Cómo pudo conducir eso a un significativo punto de vista sobre nuestro proceso mental? La respuesta a esas cuestiones es una de las menos conocidas, pero también una de las aventuras intelectuales más importantes e intrigantes registradas hasta ahora.

Einstein partió de su teoría especial de la relatividad. Pese a haber tenido tan gran éxito, no estaba satisfecho del todo con ella porque se aplicaba tan sólo a sistemas de coordenadas moviéndose uniformemente unos en relación con otros. ¿Es posible, pensó Einstein, explicar el mismo fenómeno visto desde dos distintos marcos de referencia, uno de ellos moviéndose uniformemente y el otro con movimiento no-uniforme, de tal modo que haya una explicación consistente para el fenómeno en términos del sistema de referencia que se mueve uniformemente y del otro que se mueve de manera no-uniforme? En otras palabras, ¿podemos describir acontecimientos que suceden en un sistema de coordenada que se está moviendo de manera no-uniforme en términos que resulten significativos para un observador situado en un sistema de coordenadas que se mueve de ma-

---

triángulos en el espacio) y consideró que su axioma sobre las paralelas no era evidente por sí mismo, es decir, no era un puro producto de la mente.

La opinión presentada aquí es que las idealizaciones extraídas de la experiencia (como la geometría euclidiana) forman una estructura rígida de tal durabilidad que, cuando la subsecuente experiencia sensorial la contradice, ponemos en duda la validez de los datos sensoriales antes que la validez de las abstracciones idealizadas. Una vez que se ha alzado (verificado) en la mente esa serie de idealizaciones abstractas, las sobreponemos sobre todos los datos sensoriales reales y proyectados, es decir, sobre el universo entero como nos las representamos de acuerdo con esa serie de abstracciones, tanto si concuerdan como si no.

nera uniforme, o a la recíproca? ¿Podemos crear una física que sea válida para observadores en ambos marcos de referencia?

Sí, descubrió Einstein, es posible para los observadores situados en dos distintos marcos de referencia relacionarse de una manera que sea significativa en términos de su propio estado de movimiento y en términos de otro estado de movimiento. Para ilustrar esto, recurrió a otro de sus famosos experimentos mentales.

Imaginemos un ascensor en un edificio de una extraordinaria altura. El cable que sostiene el ascensor se ha roto y el ascensor está cayendo a plomo hacia el suelo. En el interior del ascensor hay varios físicos. No se han enterado de que el cable se ha roto y, como no hay ventanas en el ascensor, no pueden mirar al exterior.

La cuestión es, ¿qué idea de su situación tienen los observadores que están en el exterior del ascensor (nosotros) y cuál es la que tienen los observadores que van en el interior del ascensor (los físicos)? Dado que se trata de un experimento mental, idealizado, podemos prescindir de los efectos de la fricción y de la resistencia del aire.

Para nosotros la situación aparece clara. El ascensor está cayendo y tan pronto como se estrelle contra el suelo todos sus ocupantes morirán. Mientras el ascensor cae va acelerando su velocidad de acuerdo con la ley de la gravedad de Newton. El movimiento del ascensor no es uniforme sino acelerado, debido al campo de gravitación de la tierra.

Nosotros podemos predecir muchas de las cosas que pueden ocurrir en el interior del ascensor. Por ejemplo: si alguien dentro del ascensor deja caer un pañuelo no ocurrirá nada, salvo que parecerá flotar ante los observadores del interior del ascensor porque acelerará su caída hacia el suelo al mismo ritmo que el ascensor y los que van dentro de él. En realidad no es que flote nada, sino que todo estará cayendo al mismo ritmo, y, por tanto, no habrá cambio alguno en sus posiciones relativas.

Para una generación de físicos nacidos y educados en el interior del ascensor, sin embargo, las cosas tendrían un aspecto bastante distinto. Para ellos, los objetos dejados caer no caen, simplemente se quedan quietos en medio del aire. Si alguien empuja a uno de esos objetos «flotantes» éste se moverá en línea recta hasta que tropiece con uno de los lados del ascensor. Para los observadores situados en el interior del ascensor no hay fuerzas actuantes sobre ninguno de los objetos situados en el interior del ascensor. En resumen: esos observadores llegarán a la conclusión de que se hallan en un sistema inercial coordenado. Las leyes de la mecánica son perfectamente válidas. Sus experimentos siempre producirán resultados coincidentes con las predicciones teóricas. Un objeto en reposo sigue en reposo. Un objeto en movimiento continúa en movimiento. Los objetos en movimiento sólo son desviados de sus sendas por fuerzas que son proporcionales al grado de desviación. Cada reacción tiene una contrarreacción opuesta equivalente. Si empujamos a una silla flotante se pondrá en movimiento en una dirección y los que la hayamos empujado nos iremos en dirección contraria con un momento igual (aunque con una velocidad

más lenta debida a que nuestra masa es mayor).

Los observadores en el interior del ascensor tienen una explicación consistente para los fenómenos ocurridos en el interior del ascensor: se encuentran en un sistema inercial de coordenadas y lo pueden demostrar valiéndose de las leyes de la mecánica.

Los observadores exteriores, situados fuera del ascensor, tienen también una explicación consistente para los fenómenos que están ocurriendo en el interior del ascensor: el ascensor está cayendo en un campo de gravitación. Sus ocupantes no se dan cuenta de ello, puesto que no están en condiciones de observar el exterior, así que no hay forma de que puedan detectar ese campo mientras están cayendo. Su sistema de coordenadas está en estado de movimiento acelerado, pese a que ellos creen que no se mueven en absoluto.

El puente entre esas dos explicaciones es la gravedad.

El ascensor en caída es una edición de bolsillo del sistema inercial coordenado. Un sistema inercial coordenado auténtico no está limitado en el espacio ni en el tiempo. La edición del ascensor lo está tanto en el espacio como en el tiempo. Está limitado en el espacio porque un objeto que se mueva en línea recta en su interior no seguirá moviéndose en línea recta para siempre, sino solamente hasta que tropiece con una de las paredes. Está limitado en el tiempo porque en un momento u otro el ascensor acabará por estrellarse contra el suelo y su existencia acabará repentinamente.

De acuerdo con la teoría especial de la relatividad, además, resulta muy significativo el hecho de que el ascensor está limitado en tamaño porque, de otro modo, no aparecería a los ojos de sus ocupantes como un sistema inercial coordenado. Por ejemplo, si los físicos en el interior del ascensor dejan caer simultáneamente dos pelotas de béisbol, éstas flotarán en el aire exactamente donde fueron dejadas y se quedarán allí. Para el observador exterior están cayendo de manera paralela entre sí. Sin embargo, si el ascensor tuviera el tamaño de Texas y las pelotas fueron dejadas con una separación entre sí como la distancia que hay de un extremo a otro de Texas, las pelotas no caerían de manera paralela entre sí, sino que *convergerían,* puesto que cada una de ellas sería atraída por la gravedad hacia el centro de la tierra. El observador situado en el interior del gigantesco ascensor se daría cuenta de que las pelotas, como cualquiera de los demás objetos flotantes en el ascensor se irían aproximando entre sí con el transcurso del tiempo como si hubiera una atracción mutua entre ellos. Esa atracción mutua aparecería como una «fuerza» que afectaba a los objetos en el interior del ascensor y, bajo tales circunstancias, los físicos en el interior del ascensor difícilmente podrían deducir que se hallaban en un sistema de coordenadas inercial.

En resumen, si es lo suficientemente pequeño, *un sistema coordenado, en caída en un campo gravitacional, es el equivalente a un sistema inercial coordenado.* Éste es el principio de la equivalencia de Einstein. Es una pieza aclaratoria de la destreza mental de Einstein. Cualquier cosa semejante

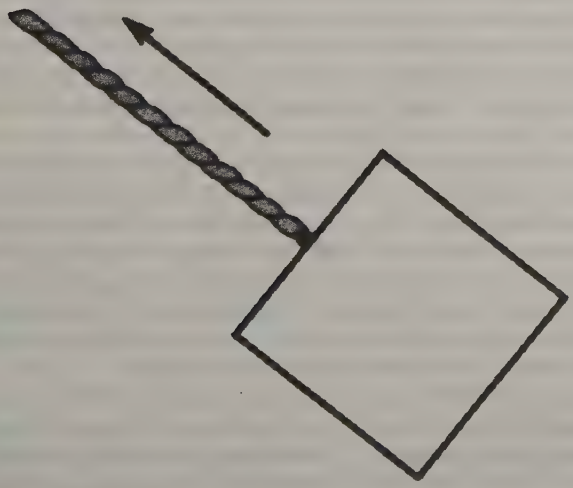
a un «sistema de coordenadas inercial», que puede ser «suprimido»[2] (son palabras de Einstein) presumiendo la existencia de un campo gravitacional, difícilmente se merece el calificativo de absoluto (como en «movimiento absoluto» o «reposo absoluto»). Mientras que los observadores en el interior del ascensor experimentan la falta de movimiento y la ausencia de la gravedad, los observadores en el exterior del ascensor ven un sistema coordenado (el ascensor) en caída acelerada en un campo de gravitación.

Permítasenos, ahora, imaginar una variante a esa situación.

Supongamos que *nosotros,* los observadores externos, nos encontramos en un sistema coordenado inercial. Ya sabemos lo que ocurre en un sistema tal: las mismas cosas que ocurren en un ascensor en caída. No hay fuerzas, ni siquiera la de la gravedad, que nos afecten. Por consiguiente, permítasenos suponer que flotamos cómodamente. Los objetos en reposo continúan en reposo y los objetos en movimiento continúan en línea recta para siempre y cualquier acción produce una reacción igual y opuesta.

En nuestro sistema inercial hay un ascensor. Alguien ha sujetado una cuerda al ascensor y tira de él en la dirección indicada en el dibujo. Dado que se trata de un experimento mental, no importa cómo podría ser llevado a cabo esto. El ascensor es arrastrado por una fuerza constante, lo que quiere decir que se halla en un estado de aceleración constante en dirección a la flecha. ¿De qué modo apreciarían la situación los observadores situados fuera y los situados dentro del ascensor?

Al flotar fuera del ascensor experimentaríamos que nuestro marco de referencia estaba en reposo absoluto y que no hay gravedad que lo afecte. Vemos como el ascensor es arrastrado por la cuerda con un movimiento uniformemente acelerado y, por tanto, podemos predecir algunas cosas



sobre él. Todo lo que esté dentro del ascensor, si no está firmemente sujeto chocará rápidamente con el suelo del ascensor. Si alguien dentro del ascensor deja caer un pañuelo, el suelo del ascensor se precipita para chocar con el pañuelo. Si alguien trata de saltar sobre el suelo, éste se adelantará rápidamente y está, de manera instantánea, de nuevo bajo sus pies. El suelo del ascensor chocará continuamente con cualquier cosa que se oponga a su camino cuando acelera su movimiento hacia arriba.

En el interior del ascensor, sin embargo, la apreciación de lo que ocurre es diferente. Para una generación de físicos, nacidos, crecidos y educados dentro del ascensor hablar de un movimiento ascendente acelerado es una fantasía (recordemos que el ascensor no tiene ventanas). Para ellos su sistema coordenado está en reposo. Los objetos caen al suelo debido a la existencia de un campo gravitacional, exactamente del mismo modo que los objetos en la tierra caen al suelo atraídos por la fuerza de la gravedad.

Tanto los observadores en el exterior como los que están en el interior del ascensor, tienen explicaciones consistentes para los fenómenos que ocurren en el interior del ascensor. Nosotros, los observadores que estamos fuera del ascensor, nos los explicamos como debidos al movimiento acelerado del ascensor. Los observadores que van en su interior los explicarán como consecuencia de la presencia de un campo gravitacional. *No hay modo, en absoluto, de determinar quién de nosotros tiene razón.*

—Espera un momento — decimos — supongamos que hago un pequeño agujero en una de las paredes del ascensor y hago pasar por él un rayo de luz. Si el ascensor está realmente en reposo, el rayo de luz incidirá sobre la pared opuesta del ascensor exactamente a la misma altura del agujero. Puesto que podemos ver que el ascensor está acelerando su movimiento ascensional, sabemos que la pared se moverá ligeramente hacia arriba en el tiempo que el rayo de luz tarde en cruzar el ascensor. Por consiguiente, el rayo de luz incidirá en la pared opuesta en un lugar ligeramente más bajo que el del agujero por el que penetra el rayo de luz. En efecto, desde el punto de vista de los que van en el interior del ascensor, el rayo de luz dará la impresión de curvarse hacia abajo, en vez de desplazarse en línea recta. Esto debería probarles que el ascensor está en movimiento.

—Esto no prueba en absoluto nada semejante — dice Jim de Wit que, naturalmente, está dentro del ascensor —. Los rayos de luz en este ascensor no viajan en línea recta. ¿Por qué tendrían que hacerlo? Estamos dentro de un campo de gravitación. La luz es energía y la energía tiene masa. La gravedad atrae a la masa, así que un rayo de luz que cruce el ascensor en su desplazamiento se verá atraído hacia abajo por la fuerza del campo gravitacional del mismo modo que lo haría una pelota de béisbol lanzada perpendicularmente a la trayectoria del rayo de luz.

No hay forma de que podamos convencer a de Wit de que su sistema coordenado está en un estado de movimiento acelerado. Todo lo que podamos decirle para probárselo, lo rechaza y lo achaca al resultado de su «campo de gravitación». *No hay forma en absoluto de distinguir entre*

movimiento uniformemente acelerado y un campo de gravitación constante.

Ésta es otra forma de expresar el principio de equivalencia de Einstein. En zonas limitadas *la gravedad es equivalente a la aceleración.* Ya hemos visto que la aceleración (en caída) a través de un campo gravitatorio es el equivalente de un sistema coordenado inercial. Ahora vemos que un «campo gravitatorio» es equivalente al movimiento acelerado. Por fin nos vamos aproximando a la teoría *general* de la relatividad, una teoría válida para todos los marcos de referencia, independientemente de su estado de movimiento.

El puente que une las explicaciones de los observadores dentro del ascensor con las explicaciones de los observadores que están fuera es la gravedad. El indicio que indicó a Einstein que la gravedad era la clave de su teoría general era tan antigua como la propia física.

Hay dos clases de masa, lo que quiere decir que hay dos formas de hablar de ello. La primera es la masa de gravitación. La masa de gravitación de un objeto, hablando en términos generales, es el peso del objeto en una balanza. En ocasiones uno de esos objetos pesa tres veces más que otro objeto que tiene tres veces mayor masa. La masa gravitacional es la medida de la fuerza de la gravedad que la tierra ejerce sobre un objeto. Las leyes de Newton describen los efectos de esta fuerza que varía con la distancia de la masa a la tierra. Aun cuando las Leyes de Newton describen los efectos de esta fuerza, no la definen. Éste es el misterio de una acción-a-distancia (pág. 43). ¿Cómo puede la tierra invisible alcanzar y atraer a los demás objetos?

El segundo tipo de masa es la masa inercial. La masa inercial es la medida de la resistencia de un objeto a la aceleración (o a la desaceleración que es una aceleración negativa). Por ejemplo, se necesita tres veces más fuerza para mover tres vagones de ferrocarril desde una situación de reposo a veinte kilómetros por hora (aceleración positiva), que la que se precisa para mover sólo un vagón idéntico a la misma velocidad de veinte kilómetros por hora (pág. 152). De manera semejante cuando se están moviendo hace falta tres veces más fuerza para detener a los tres vagones que para parar a uno solo. Esto se debe a que la masa inercial de los tres vagones es tres veces mayor que la masa inercial de un simple vagón.

La masa inercial y la masa gravitacional son iguales. Esto explica por qué una pluma y una bala de cañón caen a la misma velocidad en el vacío. La bala de cañón tiene una masa de gravitación cientos de veces superior a la pluma (pesa más), pero al mismo tiempo tiene cientos de veces más resistencia al movimiento (masa inercial) que la pluma. La atracción que la tierra ejerce sobre ella es cientos de veces mayor, pero también es cientos de veces mayor su tendencia a conservar su estado de reposo (o de movimiento). El resultado es que cae a la misma velocidad que la pluma, aunque aparentemente debería caer con mucha mayor rapidez.

El hecho de que la masa de gravitación y la masa de inercia son iguales era algo que se sabía hace ya trescientos años, pero los físicos creyeron

que se trataba de una pura coincidencia. No se le concedió la menor importancia hasta que Einstein publicó su teoría general de la relatividad.

La «coincidencia» de la equivalencia de la masa gravitacional y la masa inercial fue la «clave»[3] que condujo a Einstein al principio de equivalencia, que hace referencia a través de la equivalencia entre la masa de gravitación y la masa de inercia a la equivalencia entre gravedad y aceleración en sí mismas. Ésos son los hechos que aclaró el famoso ejemplo del ascensor.

La teoría especial de la relatividad hace referencia al movimiento no acelerado (uniforme).* Si se prescinde de la aceleración, se puede aplicar la teoría especial de la relatividad. Sin embargo, puesto que la gravedad y aceleración son equivalentes, esto es lo mismo que decir que la teoría especial de la relatividad es aplicable cuando se prescinde de la gravedad; pero si hay que tener en cuenta los efectos de la gravedad tenemos que emplear la teoría general de la relatividad. En el mundo físico los efectos de la gravedad pueden ser dejados de tener en cuenta en: (1) regiones remotas del espacio muy alejadas de cualquier centro de gravedad (materia), y (2) en muy pequeñas regiones del espacio.

La razón por la cual la gravedad puede ser ignorada en muy pequeñas regiones del espacio conduce al aspecto más sicodélico de todas las teorías de Einstein. La gravedad puede ser ignorada en esas regiones muy pequeñas del espacio si son lo suficientemente pequeñas para que el terreno montañoso del espacio-tiempo no sea apreciable.*

La naturaleza del continuo espacio-tiempo es semejante a la de un paisaje campestre ondulado. Las colinas que en él se forman están causadas por piezas de materia (objetos). Mientras mayores sean éstos, más se ondula el continuo espacio-tiempo. En las regiones remotas del espacio, lejos de toda materia de tamaño significativo, el continuo espacio-tiempo parece una llanura. Un trozo de materia del tamaño de la tierra causa una pequeña elevación en el espacio-tiempo y un trozo de materia del tamaño de una estrella causa una montaña relativa.

Cuando un objeto viaja por el continuo espacio-tiempo, toma la senda más sencilla entre dos puntos, y esta trayectoria es lo que los físicos llaman una «geodésica». Una línea geodésica no siempre es recta a causa de la naturaleza del terreno en el cual se encuentra el objeto.

Supongamos que nos hallamos en un globo desde el cual observamos una montaña, debajo de nosotros, en cuya cumbre hay un brillante fanal. La montaña se alza gradualmente de la llanura y su elevación va aumen-

* La teoría especial trata del movimiento uniforme de *sistemas coordenados*. La teoría especial puede ser utilizada para describir el movimiento acelerado (no-uniforme) de los objetos, siempre y cuando el sistema coordenado desde el cual el objeto está siendo observado se encuentre en movimiento uniforme.

* Algunos físicos creen que la teoría general de la relatividad será de utilidad en la escala microscópica de la física de la alta energía (en que por regla general se ignoran los efectos de la gravedad), donde se han apreciado fuertes fluctuaciones en el campo de gravitación en muy cortas distancias (10^{-14} cm).

tando hasta que, cerca ya de su cima se eleva de manera casi vertical. Hay varias aldeas rodeando la montaña, con sendas que unen unas con otras. Cuando los caminos se aproximan a la montaña todos ellos comienzan a curvarse de un modo u otro, para evitar el tener que subir innecesariamente en la montaña.

Supongamos que es de noche cuando miramos abajo desde el globo. No podemos ver la montaña ni las veredas o caminos; lo único que vemos es el fanal de la cumbre de la montaña y las antorchas que llevan los caminantes que van por las veredas. Si observamos con atención veremos que las antorchas se desvían de la línea recta cuando se van aproximando a las proximidades del fanal. Algunas de esas trayectorias se curvan graciosamente en torno al fanal a alguna distancia de él. Otras se aproximan más a él, pero mientras más se aproximen más bruscamente se curvarán para rodearlo.

Ante esa observación es probable que deduzcamos que el fanal emite cierta fuerza que repele los intentos de aproximarse a él de los portadores de las antorchas. Podríamos especular, por ejemplo, con la idea de que el fanal es excesivamente caliente y resulta doloroso aproximarse a él.

Al llegar la luz del día, vemos que el fanal está en la cumbre de una montaña y que no tiene nada que ver con los movimientos de los portadores de las antorchas. Éstos se limitaban, simplemente, a seguir el camino más fácil para ir de unas aldeas a las otras, es decir, desde su punto de origen a su punto de destino.

Este ejemplo magistral de analogía es obra de Bertrand Russell. En su caso, la montaña es el sol; los caminantes son planetas, asteroides, cometas (y los desechos del programa espacial); las sendas son sus órbitas y la llegada de la luz del día es la aparición de la teoría general de la relatividad de Einstein.

La clave de todo está en que los objetos del sistema solar no se mueven como lo hacen debido a que cierta misteriosa fuerza (la gravedad) actúa sobre ellos según su distancia al sol, sino debido a la naturaleza del lugar a través del cual se desplazan.

Arthur Eddington ilustró la misma situación de forma distinta. Supongamos, sugirió, que nos encontramos a bordo de un bote mirando a través de las aguas limpias y transparentes. Podemos ver la arena del fondo y a los peces que nadan por debajo de nosotros. Observamos y nos damos cuenta de que los peces parecen ser repelidos por un determinado punto. Cuando se aproximan a él se desvían bien a la izquierda bien a la derecha pero nunca pasan sobre él. Ante la observación de esos hechos quizá deduzcamos que en ese punto hay una fuerza repelente que obliga a los peces a desviarse y alejarse de allí.

Sin embargo, si observamos con mayor atención, desde dentro del agua, veremos que una enorme estrella de mar se ha enterrado en el fondo creando una especie de gran montaña de arena. Los peces que nadan en el fondo encuentran más sencillo desviarse que no elevarse cuando nadan por encima del montón de arena. No hay ninguna fuerza que obligue al pez

a dar aquella vuelta. Si todo eso hubiera sido bien observado desde el primer momento, hubiéramos comprendido que el pez no hacía otra cosa que buscar el mejor camino en su desplazamiento.

El movimiento del pez no estaba determinado por la fuerza emanada del misterioso lugar, sino por la naturaleza del terreno por el que se desplazaba (la estrella de mar de Eddington fue llamada «Albert»). Si pudiéramos ver la geografía (la geometría) del continuo espacio-tiempo, veríamos que, como en los ejemplos anteriores, es él, en sí, y no «fuerzas actuantes entre los objetos», la razón por la cual los planetas se mueven del modo como lo hacen.

Realmente, no resulta posible para nosotros ver la geometría del continuo espacio-tiempo porque se trata de un continuo cuatridimensional y nuestra experiencia sensorial está limitada a tres dimensiones. Por esta razón ni siquiera resulta posible que nos lo representemos gráficamente.

Por ejemplo, supongamos que existiera un mundo poblado por seres bidimensionales. Ese mundo tendría el aspecto de unas imágenes en la pantalla de un televisor. Las gentes y los objetos de ese mundo bidimensional, tendrían altura y anchura, pero no grosor. Si esas figuras bidimensionales tuvieran su propia vida e inteligencia, su mundo aparecería ante ellas bastante distinto que nuestro mundo aparece ante nosotros, porque ellas no estarían en condiciones de experimentar la tercera dimensión.

Una línea recta entre dos de esas personas les parecería un muro. Estarían en condiciones de rodearla por cualquiera de los extremos pero no de saltar «sobre ella», porque su existencia física estaría limitada a dos dimensiones. No podrían salir de la superficie de la pantalla al mundo tridimensional. Sabrían lo que es un círculo, pero no podrían imaginarse lo que es una esfera. En realidad una esfera les parecería simplemente un círculo.

Si les gustaba la exploración, pronto descubrirían que su mundo era plano e infinito. Si dos de ellos caminaban separándose en direcciones opuestas, nunca más volverían a encontrarse.

Lógicamente, esos seres inteligentes crearían una geometría simple. Más pronto o más tarde generalizarían sus experiencias en abstracciones para poder mantener y crear las cosas que desearan en su mundo bidimensional. Descubrirían, por ejemplo, que siempre que se unen tres barras rígidas de hierro para construir un triángulo, los ángulos formados siempre sumarían en conjunto 180 grados. Antes o después los más perceptivos entre ellos sustituirían las barras metálicas por idealizaciones mentales (líneas rectas). Esto los llevaría a la conclusión abstracta de que un triángulo, que por definición estaba formado por tres líneas rectas, siempre contenía 180 grados. Para seguir averiguando cosas sobre los triángulos no necesitarían construirlos realmente.

La geometría que esos seres bidimensionales crearían es la misma que nosotros aprendemos de niños en la escuela. Se llama geometría euclidiana en honor del griego Euclides, cuyas ideas sobre el tema eran tan convincentes que no necesitaron ser ampliadas en casi dos mil años. (El conte-

nido de la mayor parte de los libros de geometría utilizados en los Institutos de enseñanza media y superior tienen casi dos mil años de antigüedad.)

Bien, ahora supongamos que alguien, desconocido para ellos, tomara a esos hombres bidimensionales y los trasladara a la superficie de una esfera enormemente grande. Esto significaría que en vez de ser perfectamente plano, su mundo físico sería un poco curvado. Al principio ninguno de ellos apreciaría la diferencia. Pero, si su tecnología se hacía más avanzada y eso les permitía comenzar a viajar y comunicarse a largas distancias, acabarían por hacer un notable descubrimiento: que su geometría no se verificaba en su mundo físico.

Descubrirían, por ejemplo, que si construían un triángulo lo suficientemente grande y medían sus ángulos, éstos tendrían ¡más de 180 grados! Éste es un fenómeno que nosotros podemos representarnos fácilmente. Supongamos un triángulo, cuyo vértice sea el polo Norte, dibujado sobre un globo. Las dos líneas que se interceptan allí forman un ángulo recto. El ecuador es la base del triángulo. Obsérvese qué sucede: los dos lados del triángulo al interceptar el ecuador forman también ángulos rectos. De acuerdo con la geometría euclidiana, un triángulo contiene dos ángulos rectos (180 grados), sin embargo, este triángulo contiene *tres* ángulos rectos (270 grados).

Recordemos que, en nuestro ejemplo, los seres bidimensionales habían observado un triángulo en lo que ellos creían que era su mundo bidimensional, plano, y al medir los ángulos obtenían 270 grados. ¡Qué confusión! Una vez templados los ánimos se darían cuenta de que solamente había dos posibles explicaciones.

La primera explicación posible sería que las líneas rectas usadas para construir el triángulo (por ejemplo, rayos de luz) no eran realmente rectas aunque parecieran serlo. Esto podría explicar el excesivo número de grados en el triángulo. Sin embargo, si era ésta la explicación adoptada por ellos, en ese caso tendrían que crear una «fuerza» responsable para que de un modo u otro modificara las líneas rectas (como por ejemplo la gravedad). La segunda explicación sería que su geometría abstracta no podía ser aplicada a su mundo real. Eso es otra forma de decir que, por imposible que esto suene, su universo no era euclidiano.

La idea de que su realidad física no era euclidiana probablemente les parecería tan fantástica a ellos (especialmente si en el transcurso de dos mil años no habían tenido motivos para poner en duda la realidad de la geometría euclidiana) que lo más probable es que escogieran la primera explicación y empezaran a buscar fuerzas a las que considerar responsables de la distorsión de las líneas rectas.*

* Eddington expresó este concepto de manera más concisa: *Un campo de fuerzas representa la discrepancia entre la geometría natural de un sistema coordenado y la geometría abstracta arbitrariamente adscrita a él.* (Arthur Eddington, *The Mathematical Theory of Relativity,* Cambridge, Inglaterra, Cambridge Press, págs. 37 y 38.

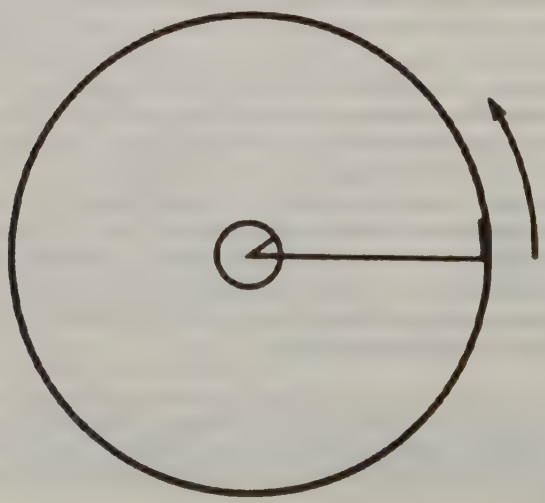
El problema, en el caso de haber elegido esta explicación, es que se verían obligados a crear una fuerza responsable cada vez que su mundo físico no confirmara los postulados de la geometría euclidiana. Eventualmente la estructura de esas fuerzas necesarias se haría tan compleja que resultaría más fácil olvidar todo aquello y admitir que su mundo físico no seguía las reglas lógicas e irrefutables de la geometría de Euclides.

Nuestra situación es semejante a la de las personas bidimensionales que no pueden percibir, pero que deducen viven en un mundo tridimensional. Nosotros somos seres tridimensionales que no podemos percibir un universo cuatridimensional, pero sí deducir que estamos viviendo en él.

Durante dos mil años hemos supuesto que todo el universo físico, al igual que la geometría creada por los antiguos griegos basándose en su experiencia con una parte de él, era euclidiano. Si la geometría de Euclides fuera universalmente válida podría ser verificada en cualquier lugar del mundo físico. Y este supuesto es falso. Einstein fue la primera persona que vio que el universo no estaba sujeto a las reglas de la geometría euclidiana, pese a que nuestras mentes, tozudamente, se afianzaban a la idea de que sí lo estaba.

Pese a que no podemos percibir el continuo cuatridimensional espacio-tiempo directamente, de lo que ya sabemos por la teoría especial de la relatividad podemos deducir que nuestro universo no es euclidiano. He aquí otro de los experimentos mentales de Einstein.

Imaginemos dos círculos concéntricos, uno con un radio pequeño y otro con un radio muy largo. Ambos giran en torno a su centro común como se muestra en el dibujo.



Imaginemos que nosotros, los observadores, estamos contemplando estos círculos giratorios desde un sistema coordenado inercial. Estar en un sistema coordenado inercial significa simplemente que nuestro marco de referencia está en reposo relativo frente a todo, incluso a los círculos giratorios. Dibujados sobre los dos círculos giratorios mencionados hay otros dos círculos concéntricos que están en nuestro sistema coordenado. Éstos no giran. Tienen el mismo tamaño que los círculos giratorios y el mismo centro común, pero se mantienen inmóviles. Mientras que nosotros y nuestros círculos que no giran continuamos inmóviles, estamos en comunicación con un observador que está en uno de los círculos giratorios. Lógicamente gira con él.

De acuerdo con la geometría euclidiana, la relación del radio con la circunferencia es siempre la misma en todos los círculos. Si medimos el radio y la circunferencia del pequeño círculo, por ejemplo, la relación entre dos medidas será la misma que la existente entre el radio y la circunferencia del círculo mayor. El objeto de este experimento mental es determinar si esto es cierto o no para los observadores en los círculos estacionarios (nosotros) y el observador que se encuentra en los círculos giratorios. Si la geometría de Euclides fuese válida en todo el universo físico, como se suponía, la relación entre el radio y la circunferencia tendría que ser la misma en todos los círculos que intervienen en el experimento.

Tanto nosotros como el observador que se encuentra en los círculos que giran usaremos la misma regla para realizar las mediciones. «La misma regla», significa que le daremos a él la misma regla que hemos utilizado nosotros para realizar nuestras medidas, o que usaremos reglas que tienen la misma longitud cuando están en reposo en el mismo sistema coordenado.

Nosotros comenzamos. Utilizando nuestra regla medimos el radio de nuestro círculo pequeño y después la circunferencia de nuestro círculo pequeño. Tomamos nota de la relación existente entre ambos. El segundo paso consiste en hacer lo mismo en el círculo grande. Anotamos la relación entre ellos. Sí, esa relación es la misma que encontramos en el círculo pequeño. Hemos probado de ese modo que la geometría euclidiana es válida en nuestro sistema coordenado, que es un sistema coordenado inercial.

Después de hecho esto, le ofrecemos la regla al observador que está en los círculos que giran. Usando esta regla él mide primero el radio del círculo pequeño y ve que es el mismo que el radio de nuestro círculo pequeño, puesto que nuestros círculos han sido trazados de manera que se superponen exactamente. Seguidamente mide la circunferencia de su pequeño círculo. Recordemos que el movimiento hace que las reglas se contraigan en la dirección en que se mueven. Sin embargo, como el círculo es pequeño la velocidad de la regla cuando se sitúa sobre la circunferencia, pequeña para realizar la medida, no es suficiente para hacer perceptible el efecto de la contracción relativista. Por consiguiente, el observador mide la circunferencia de su círculo pequeño y encuentra que tiene la misma longitud que nuestra circunferencia pequeña. Naturalmente la razón o re-

lación entre ellas y sus respectivos radios es la misma. Las relaciones hasta ahora determinadas entre los radios y las correspondientes circunferencias, es decir, en nuestros dos círculos y en el círculo pequeño en giro, son idénticas. Hasta ahora todo va bien. Esto es lo que debía ocurrir de acuerdo con nuestros libros de geometría de Bachillerato. Nos queda todavía un círculo que comprobar.

El observador de los círculos giratorios mide el radio de su gran círculo y obtiene que su longitud es idéntica a la del radio de nuestro círculo grande. Le queda por realizar la última medición: la circunferencia de su círculo grande. Sin embargo, en el momento en que coloca la regla sobre la circunferencia del círculo grande que gira ¡la regla se contrae! Debido a que el radio de este círculo es muchísimo mayor que el del círculo pequeño la velocidad de la circunferencia del círculo grande que gira es considerablemente mayor que la de la circunferencia del círculo pequeño.

Puesto que la regla ha sido colocada en la dirección en que se mueve la circunferencia la regla se acorta. Cuando el observador usa esta regla para medir la circunferencia del círculo grande encuentra que la longitud de esta circunferencia es mayor que la de nuestro círculo grande. Esto se debe a que la regla con la que hacemos la medida es más corta en el momento de utilizarla. (La contracción también afecta a la regla al medir el radio, pero puesto que la colocamos de manera perpendicular a la dirección del movimiento se hace más delgada, pero no más corta.)

Esto significa que la relación entre el radio y la circunferencia del círculo pequeño y la del radio y la circunferencia del círculo grande (ambos girando sobre el mismo punto) no es la misma. De acuerdo con la geometría de Euclides esto no es posible. ¡Pero lo es!

Si queremos mantener una actitud anticuada sobre el problema (antes de Einstein), podemos decir que esta situación no tiene nada de extraordinario. Por definición, las leyes de la mecánica y de la geometría de Euclides sólo son válidas en sistemas inerciales (es lo que hace que esos sistemas sean inerciales). Simplemente no tomaremos en consideración aquellos sistemas que no sean inerciales. (Ésta era realmente la postura de los físicos antes de Albert Einstein.) Pero eso fue, exactamente, lo que le pareció falso o erróneo a Einstein. Su intención era crear una física válida para todos los sistemas coordenados, puesto que el universo abunda tanto en sistemas inerciales como no-inerciales.

Si queremos crear una física con tal validez universal, una física general, tenemos que considerar con la misma seriedad a los observadores en el sistema estacionario (inercial) como al observador situado en los círculos giratorios (un sistema no-inercial). La persona situada en los círculos giratorios tiene el mismo derecho a relacionar el mundo físico con su marco de referencia que nosotros a relacionarlo con el nuestro. Es cierto que las leyes de la mecánica así como las de la geometría euclidiana no son válidas en su marco de referencia, pero cualquier desviación de ellas puede ser explicada en términos de un campo de gravitación que afecte a ese marco de referencia.

Y eso es lo que nos permite la teoría de Einstein: expresar las leyes de la física de un modo que resulten independientes de coordenadas espacio-tiempo específicas. Las coordenadas espacio-tiempo (mediciones) varían de un marco de referencia a otro, según el estado de movimiento de referencia. La teoría general de la relatividad nos permite universalizar las leyes de la física y aplicarlas a todos los sistemas de referencia.

—Espera un momento — decimos —. ¿Cómo se pueden medir distancias en un sistema de coordenadas como el de los círculos giratorios? La longitud de la regla varía de un lugar a otro en tal sistema. Mientras más nos alejemos del centro, mayor será la velocidad de la regla y, por tanto, su contracción. Esto no ocurre en un sistema coordenado inercial, que es un sistema en reposo. Puesto que no hay cambio de velocidad en todo el sistema coordenado inercial la regla no modifica su longitud.

—Esto nos permite organizar los sistemas inerciales como una ciudad, bloque a bloque. Puesto que las reglas no cambian de longitud en ese sistema inercial todos los bloques construidos con la misma regla tendrán la misma longitud. Dondequiera que vayamos sabremos que si medimos diez manzanas obtendremos siempre una distancia doble que si medimos cinco manzanas.

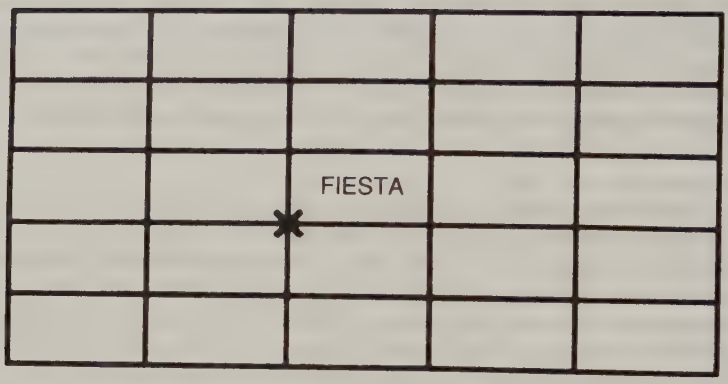
—En un sistema no inercial la velocidad del sistema varía de un lugar a otro. Esto significa que la longitud de la regla cambia de un lugar a otro. Si usamos la misma regla para trazar los bloques o manzanas de toda la ciudad en un sistema coordenado no-inercial, algunos de estos bloques serán mayores que los otros en relación con el lugar donde estén situados.

—¿Y qué hay de malo en ello — nos pregunta Jim de Wit — en tanto que podamos establecer nuestra posición en el sistema coordenado? Imaginemos una plancha de caucho en la que hemos dibujado una especie de rejilla que parece un gráfico (dibujo superior de la página 182). Es un sistema de coordenadas. Supongamos que nos encontramos en el ángulo inferior izquierdo (podemos estar en cualquier sitio que deseemos) y digamos que en el lugar marcado con una X y la palabra «Fiesta» señala el lugar donde se celebra una reunión a la que se nos ha invitado. Para llegar allí tenemos que andar dos cuadrados hacia la derecha y dos hacia arriba.

—Ahora supongamos que estiramos la plancha de caucho hasta hacer que adquiera la forma del segundo dibujo, el de la parte inferior.

Las mismas instrucciones (dos cuadros hacia la derecha y dos hacia arriba) nos llevarán al lugar de la fiesta. La única diferencia es que, salvo que estemos familiarizados con esa zona del sistema de coordenadas, no podemos calcular la distancia que hemos de recorrer para llegar a la fiesta con la misma sencillez que lo haríamos si cada una de las casillas tuviera las mismas dimensiones.

De acuerdo con la teoría general de la relatividad, la gravedad, que es equivalente a aceleración, es lo que causa la distorsión en el continuo espacio-tiempo, de modo análogo a como hemos estirado la plancha de caucho. Allí donde los efectos de la gravedad pueden ser despreciados, el



continuo espacio-tiempo es igual que la plancha antes de ser estirada (distorsionada). Todas las líneas son rectas y todos los relojes están sincronizados. En otras palabras, la plancha no distorsionada es análoga a un continuo espacio-tiempo en un sistema coordenado inercial y la teoría especial de la relatividad tiene aplicación y se verifica.

Sin embargo, en el universo no puede ser despreciada una potente fuerza de gravedad. Dondequiera que hay un trozo de materia se deforma el continuo espacio-tiempo. Mientras mayor sea el trozo de materia mayor es la deformación.

En el ejemplo citado de los círculos giratorios, el cambio de velocidad en las distintas partes del sistema coordenado hace que la regla cambie de

tamaño. Sin apartar esto de nuestra mente recordemos que la *aceleración (cambio de velocidad) es equivalente a la gravedad.* Por consiguiente, los cambios de intensidad de un campo de gravedad producen la misma contracción de la regla que los cambios de velocidad. «Aceleración» y «gravedad» son dos maneras de decir lo mismo. Esto quiere decir que si una regla está sujeta a campos gravitatorios de distinta intensidad su longitud cambia.

Desde luego resulta imposible viajar a través de nuestro sistema solar, y menos todavía por nuestra galaxia, sin encontrar campos gravitatorios de intensidad diversa, lo que hará que cualquier mapa que dibujemos parezca distorsionado como la plancha de caucho. El terreno del continuo espacio-tiempo en el que se mueve nuestra tierra es como un terreno abrupto, ondulado, con una montaña (el sol) dominando su geografía.

De acuerdo con Newton la tierra debería desplazarse en línea recta, pero ha sido desplazada para siempre de su ruta por la fuerza de gravitación del sol. Un equilibrio entre esas dos fuerzas mantiene a la tierra en órbita alrededor del sol. De acuerdo con Einstein la órbita solar es simplemente el camino más fácil que la tierra toma en su viaje por el espacio-tiempo, curvado como está en las proximidades del sol.

Imaginad lo compleja que debe ser la geografía del continuo espacio-tiempo que es nuestro universo con su sistema solar, sistemas estelares, galaxias y racimos de galaxias, todos ellos causando «bultos» mayores o menores, curvas, colinas, valles y montañas en el continuo espacio-tiempo.

¿Pero es posible navegar en tales circunstancias?

Sí. Aun cuando se trata de un ejemplo un tanto simple, los marinos navegan en circunstancias análogas. Hemos cubierto la tierra con cuadriláteros que están formados por líneas de longitud y latitud. El tamaño de esos cuadriláteros depende del lugar donde están situados. Mientras más próximos están al ecuador mayores son. (Si la cosa no os parece clara contemplad un globo terráqueo.) Mediante ese sistema podemos designar cualquier punto en la superficie de la tierra designando la intersección de una línea de latitud con una línea de longitud. Conocer el número de cuadriláteros entre el lugar en que estamos y el lugar a donde queremos llegar no nos da la distancia a recorrer porque los recuadros son de distintos tamaños. Sin embargo, como conocemos la naturaleza de nuestro terreno (una esfera) podemos calcular distancias en él (mediante la trigonometría esférica).

De manera semejante, una vez que conocemos las propiedades de una zona del continuo espacio-tiempo (mediante su exploración), no sólo podemos determinar nuestra posición, sino también la distancia (intervalo) entre dos acontecimientos en el continuo espacio-tiempo.* La estructura

* La distancia, desde luego, es «invariable», es decir, es la misma para todos los sistemas coordenados (pág. 161). La invariabilidad es el aspecto absoluto objetivo de la teoría de Einstein que complementa la elección arbitraria subjetiva de un sistema coordenado.

matemática de la teoría general de la relatividad, que Einstein creó a lo largo de diez años, nos permite hacerlo así exactamente.

Las ecuaciones de la teoría general de la relatividad son fórmulas estructurales. Describen la estructura de los campos gravitatorios cambiantes. (La fórmula de Newton describe una situación entre dos objetos en un tiempo dado. Las fórmulas de Einstein relacionan una situación *aquí y ahora* con una situación de inmediata vecindad un poco más tarde.) Aplicando los resultados de observaciones reales a esas ecuaciones, éstas nos dan una imagen del continuo espacio-tiempo en los lugares próximos a nuestras observaciones. En otras palabras, nos revelan la geometría del espacio-tiempo en esa zona. Una vez que conocemos eso, nuestra situación es, en términos muy generales, análoga a la de un marino que sabe que la tierra es redonda y, además, sabe trigonometría esférica.*

Hemos dicho, hasta ahora, que la materia distorsiona, o causa una curvatura, del continuo espacio-tiempo en sus proximidades. Según la definitiva visión de Einstein, que nunca llegó a probar (demostrar matemáticamente), ¡un trozo de materia *es* una curvatura del continuo espacio-tiempo! En otras palabras, según esta definitiva perspectiva de Einstein, no existen cosas tales como «campos gravitatorios» ni «masas». Éstas son simplemente creaciones mentales, que no existen en el mundo real. No existe la gravedad — la gravedad es el equivalente de aceleración que es movimiento —. No existe la «materia» — la materia es una curvatura del continuo espacio-tiempo —. Ni siquiera existe la «energía», puesto que energía es igual a masa y masa es una curvatura del espacio-tiempo.

Lo que habíamos creído que era un planeta que tenía su propio campo gravitatorio y que se movía en torno al sol en una órbita creada por la atracción de la gravitación de éste, en realidad es una pronunciada curvatura del continuo espacio tiempo que busca su más sencillo camino a través del continuo espacio-tiempo en la proximidad de una curvatura muy pronunciada de ese continuo espacio-tiempo.

No existe, pues, nada aparte de espacio-tiempo y movimiento y estas dos cosas son, además, sólo una misma cosa. He aquí una exquisita representación, en términos completamente occidentales, del aspecto más fundamental de las filosofías del taoísmo y el budismo.

La física es el estudio de las realidades físicas. Si una teoría no está relacionada con el mundo físico, puede ser matemáticas puras, poesía, o simples versos, pero no es física. La cuestión, de todos modos, es: ¿Funciona realmente la fantástica teoría de Einstein?

La respuesta es un sí, quizá un tanto provisional, pero generalmente aceptado. La mayor parte de los físicos están de acuerdo en que la teoría general de la relatividad es un método válido de ver fenómenos a gran

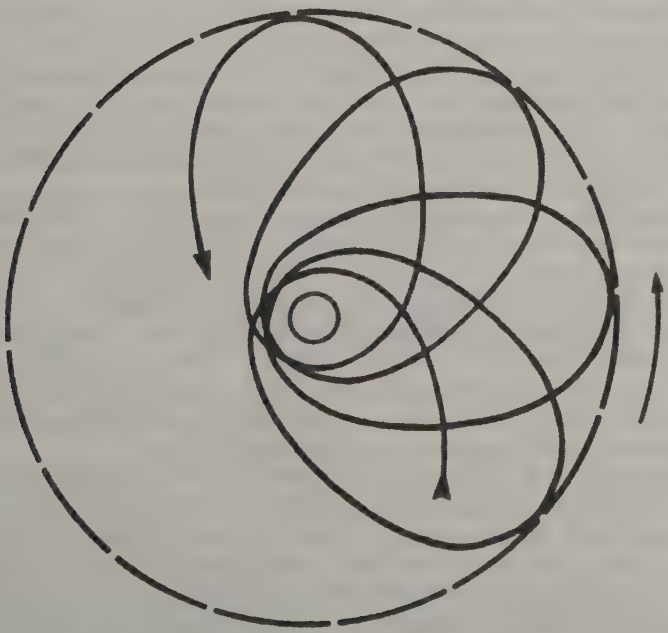
* El continuo espacio-tiempo no sólo es curvo sino que tiene propiedades topológicas, es decir, puede ser relacionado con formas absurdas, como por ejemplo un rosco. También puede torcerse (es decir, torsionarse).

escala. También son muchos los físicos que esperan ansiosos obtener mayores pruebas que confirmen (o desafíen) esta posición.

Dado que la teoría general de la relatividad se ocupa de amplísimas extensiones del universo, su prueba — de utilidad, no de «verdad» (el reloj sigue todavía sin poder ser abierto) — no puede venir de observaciones de fenómenos limitados a la tierra. Sus verificaciones proceden de la astronomía.

Hasta ahora la teoría general de la relatividad ha sido verificada de cuatro maneras. Las tres primeras son directas y convincentes. La última, si las primeras observaciones ya realizadas son correctas, podría ser aún más fantástica que la propia teoría.

La primera comprobación de la teoría general de la relatividad llegó como una inesperada ventaja para los astrónomos. La ley de la gravedad de Newton se proponía describir las órbitas de los planetas en derredor del sol y lo consiguió... ¡Con todos ellos excepto con Mercurio! Mercurio orbita en torno al sol de modo que partes de su órbita lo aproximan más al sol que los demás planetas. La parte de la órbita de Mercurio más cercana al sol se llama perihelio.* La primera verificación de la teoría gene-



* Perihelio es el punto en que un planeta, un cometa o un asteroide están más cerca del sol. (*N. del T.*)

ral de la relatividad de Einstein, resultó ser la explicación, tanto tiempo buscada inútilmente, para el desconcertante problema del perihelio de Mercurio.

El problema con el perihelio de Mercurio — en realidad con toda su órbita — está en que varía su posición. En vez de repetir su órbita continuamente en torno al sol con relación a un sistema coordenado agregado al sol, el perihelio de la órbita de Mercurio gira en torno al sol. El ritmo de rotación del perihelio es extremadamente lento (completa una revolución en torno al sol cada tres millones de años). Esto ya era más que suficiente para intrigar a los astrónomos. Antes de Einstein, esta alteración en la órbita de Mercurio fue atribuida a la existencia de un planeta de nuestro sistema solar que aún no había sido descubierto. En los tiempos en que Einstein publicó su teoría general de la relatividad, la búsqueda de este misterioso planeta se desarrollaba a marchas forzadas.

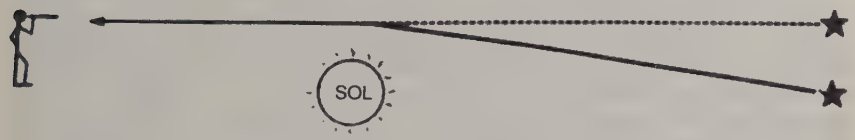
Einstein creó su teoría general de la relatividad sin prestar especial atención al perihelio de Mercurio. Sin embargo, cuando la teoría general de la relatividad fue aplicada a ese problema, demostró que si Mercurio se movía de ese modo era porque forzosamente tenía que hacerlo así en el conjunto espacio-tiempo en la proximidad del sol. Los demás planetas no se mueven apreciablemente así porque están mucho más alejados de la gravedad solar. Un gol a favor de la teoría general.

La segunda verificación de la teoría general de la relatividad fue el cumplimiento total de una predicción hecha por Einstein, que había anunciado que los rayos de luz eran curvados por los campos gravitatorios. Y lo que es más: predijo exactamente hasta qué extremo se curvaban y sugirió la realización de un experimento para poner a prueba su predicción. Lo que Einstein sugirió fue que los astrónomos midieran la desviación de la luz de las estrellas en el campo gravitatorio del sol.

Según Einstein, la presencia del sol entre un grupo de estrellas visibles y la tierra causaba un cambio aparente en la posición de las estrellas porque la luz que nos llegaba procedente de ellas se curvaba al cruzar el campo de gravedad del sol. Para poder realizar el experimento es necesario fotografiar un grupo de estrellas por la noche, tomando nota de la posición relativa entre ellas en su periferia y después volver a fotografiar el mismo grupo de estrellas durante el día, cuando el sol está entre ellas y la tierra. Naturalmente las estrellas solamente pueden fotografiarse de día en el caso de un eclipse total de sol por interposición de la luna.

Los astrónomos consultaron sus cartas celestes y descubrieron que el 29 de marzo era el día ideal para realizar la empresa. Esto se debe a que en esa fecha el sol en su aparente viaje por el firmamento pasa por delante de un grupo excepcionalmente abundante de estrellas de gran brillantez. Por una increíble coincidencia un eclipse total de sol ocurrió el 29 de marzo de 1919, sólo cuatro años después de la publicación de la teoría general de la relatividad. Se hicieron todos los preparativos necesarios para utilizar ese acontecimiento para comprobar la nueva teoría de Einstein.

Las señales lumínicas de una estrella se curvan en la proximidad del sol. Como presumimos que esa luz estelar viaja en línea recta, suponemos que la posición de la estrella es distinta a la que en realidad es.



Aun cuando se suponía que la luz viajaba en línea recta en el vacío, ya antes de que Einstein hiciera pública su teoría se había calculado la posibilidad de que sufriera una ligera curvatura. Se usó la ley de la gravedad de Newton para calcular esa curvatura, aun cuando ella no podía explicarla. La teoría de Einstein predecía una desviación aproximadamente doble de la prevista por la ley de Newton y, además, facilitaba la explicación de por qué ocurría el fenómeno. Los físicos y los astrónomos esperaban ansiosos y al unísono el resultado de esta confrontación entre la nueva teoría y la antigua.

El eclipse de 1919 fue fotografiado por dos expediciones distintas enviadas a diferentes partes del mundo. Esas mismas expediciones fotografiaron los mismos grupos de estrellas cuando el sol no estaba entre ellas y nosotros. Los resultados obtenidos por los dos grupos de científicos confirmaron las predicciones de Einstein y no las de Newton. A partir de 1919 ese mismo resultado ha venido siendo obtenido en distintos eclipses. Todos los resultaron confirmaron las predicciones de Einstein. ¡Segundo gol a favor de la teoría general de la relatividad!

La tercera verificación se llama corrimiento al rojo por la gravitación. Recuérdese que la gravedad (porque es equivalente a aceleración) no sólo hace que las reglas se contraigan, sino también que los relojes marchen con mayor lentitud.

Un reloj es algo que se repite a sí mismo de manera periódica. Un átomo, por ejemplo, es un tipo de reloj, puesto que vibra con determinada frecuencia. Cuando una sustancia, como por ejemplo el sodio, se pone al rojo vivo, la longitud de onda de la luz que emite puede ser medida adecuadamente. Esa longitud de onda nos dice con exactitud la frecuencia de las vibraciones de los átomos que forman la sustancia. Si la frecuencia varía, la longitud de onda varía también.

Si queremos comparar el ritmo de un reloj situado aquí en la tierra con otro reloj que está influenciado por un campo gravitatorio muy intenso, por ejemplo el del sol, no hay necesidad de enviar un reloj a la superficie solar. Los relojes (los átomos) ya están en sus respectivos puestos.

Einstein predijo que todo proceso periódico que tuviera lugar en un

átomo en el sol, donde la gravedad es muy intensa, tenía que realizarse a un ritmo ligeramente más lento que lo hacía en la tierra. Para probar si su predicción es cierta, lo único que tenemos que hacer es comparar la longitud de onda de la radiación de un elemento determinado cuando está presente en la luz solar y cuando se encuentra aquí en la tierra en el laboratorio. Esto se ha venido haciendo repetidas veces. En cada caso la longitud de onda medida en la luz solar era mayor que la de su contrapartida medida en el laboratorio, en la tierra. Una longitud de onda más larga significa una frecuencia más baja, más lenta. Tomemos, por ejemplo, los átomos del sodio. Vibran más lentamente bajo la influencia de un campo de gravedad tan intenso como el del sol que lo hacen en la tierra donde la gravedad es mucho menor. Y lo mismo les sucede a todos los demás átomos.

Este fenómeno se llama corrimiento hacia el rojo por la gravedad (porque la longitud de onda involucrada en el experimento parece tender hacia el extremo rojo del espectro de la luz visible cuando las longitudes de onda son más largas). ¡Tanto número tres en favor de la teoría general de la relatividad de Einstein!

Este corrimiento al rojo en el espectro, el perihelio móvil de Mercurio y la desviación de la luz estelar son fenómenos observables. Ahora vamos a entrar en un campo donde la teoría sigue predominando todavía y la observación es mínima. Sin embargo, es un terreno, con mucho, el más excitante y quizá el más estimulante de toda la historia de la ciencia. La cuarta comprobación de la teoría general de la relatividad parece ser el origen de ese fenómeno que se llama de los «agujeros negros».

En 1958, David Finkelstein publicó un escrito en el cual, basándose en la teoría general de la relatividad de Einstein, razonaba sobre un fenómeno al que llamó «membrana de una sola dirección».[4] Finkelstein mostraba que bajo determinadas condiciones en que intervenía un campo de gravedad extremadamente denso puede ocurrir que se produzca un agujero invisible en el cual la luz y los objetos físicos pueden penetrar, pero del que nunca más pueden volver a escapar.*

Al año siguiente, un joven graduado que continuaba estudiando en la Universidad de Londres, oyó a Finkelstein, que estaba dando unas conferencias como profesor invitado, explicar su membrana de una sola dirección. La idea atrajo, primero, su atención y, después, su imaginación. Ese joven estudiante era Roger Penrose. Al ocuparse del descubrimiento de Filkenstein lo desarrolló hasta convertirlo en la teoría moderna de los «Agujeros Negros».**

* Este fenómeno fue explicado teóricamente por Pierce Simon La Place en 1795, utilizando la física de Newton. Finkelstein fue el primer físico que lo formuló partiendo del punto de vista moderno de la física, es decir, de la teoría de la relatividad. Su formulación moderna dio base a las actuales teorías existentes sobre los llamados «agujeros negros».

** En realidad, el primer trabajo moderno sobre los «agujeros negros» apareció en 1939 y fue obra de J. R. Openheimer y S. Snyder. Las actuales teorías en

Un agujero negro es una región del espacio que aparece completamente negro porque la gravitación es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar a las zonas que lo rodean.* La gravitación es despreciable a nivel de laboratorio, pero es mucho más importante cuando cuerpos de gran masa están en juego. Por consiguiente, la exploración de los «agujeros negros» se ha convertido en aventura conjunta de físicos y astrónomos.

Los astrónomos especulan con la idea de que un agujero negro podría ser uno de los muchos posibles productos de la evolución estelar. Las estrellas no arden indefinidamente. Desarrollan un ciclo vital que comienza con el hidrógeno y en ocasiones termina con una masa rotatoria muy densa y totalmente consumida por la combustión. El exacto producto final de este proceso depende del tamaño de la estrella que lo está sufriendo. De acuerdo con una teoría, las estrellas que tienen un tamaño tres veces superior o más a nuestro sol terminan transformándose en «agujeros negros». Los restos de esas estrellas son inimaginablemente densos. Es posible que solamente tenga pocos kilómetros de diámetro y, sin embargo, contiene la masa entera de una estrella que fue tres veces mayor que el sol. Una masa tan densa produce un campo gravitatorio lo suficientemente intenso para atraer a todo lo que cae en sus proximidades mientras que al mismo tiempo no permite que nada, ni siquiera la luz, escape a su atracción.

Rodeando estos restos de estrellas hay un «horizonte suceso», creado por el enorme campo gravitatorio de la estrella consumida y apagada. Su función es precisamente la que Finkelstein atribuía a su membrana de una sola dirección. Cualquier cosa que entra en el campo de gravedad de esa masa es rápidamente arrastrado hacia ella y una vez pasa el «horizonte suceso» nunca más puede regresar. Este horizonte constituye la característica esencial del agujero negro. Lo que le ocurre a un objeto que pasa al otro lado de ese «horizonte» es más fantástico que el más emocionante relato de ciencia-ficción.

Si el agujero negro no está girando, el objeto será atraído directamente hacia su centro, hasta un punto llamado «la singularidad». Allí será literalmente comprimido, exprimido de toda existencia o, como dirían los físicos, reducido a volumen cero. En la singularidad del agujero negro todas las leyes de la física fallan totalmente, se desploman, e incluso desaparecen el espacio y el tiempo. Se ha especulado con que lo que cae en el interior de un agujero negro es expulsado de nuevo por «el otro lado»... ¡Y «el otro lado» es otro universo!

Si el agujero negro gira, un objeto que cruce el horizonte suceso puede fallar y no ir a parar a la «singularidad» del agujero negro (que en un

---

curso sobre los agujeros negros o, mejor dicho, de las singularidades de los agujeros negros que están más allá del espacio-tiempo, fueron desarrollados independientemente por R. Penrose y S. W. Hawking.

* En una primera aproximación, los físicos, normalmente, afirman que los agujeros negros tienen cierto brillo real debido a los fotones y otras partículas cuánticas que se abren camino a través de la membrana de una sola dirección.

agujero negro giratorio tiene forma de anillo y emergerá en otro tiempo y en otro lugar en este mismo universo (por los «agujeros de lombriz») o en otro universo (a través de los puentes de Einstein-Rosen). Si es así, los agujeros negros rotativos podrían ser el no va más en máquinas del tiempo.

Aunque los agujeros negros son casi invisibles, podemos tratar de descubrir los fenómenos observables que puedan serles característicos. El primero de ellos es la gran cantidad de radiación electromagnética. Un agujero negro está atrayendo átomos de hidrógeno, partículas cósmicas y otras muchas cosas semejantes. A medida que esas partículas y objetos van siendo atraídos por el agujero negro, su velocidad aumenta y se aceleran debido a la acción de su campo gravitatorio hasta aproximarse a la velocidad de la luz. Eso causa una tremenda cantidad de radiación electromagnética. (Toda partícula con carga que se va acelerando crea una radiación electromagnética.)

La segunda característica observable de un agujero negro es su efecto en una estrella visible que se mueve como si estuviera girando en torno a una estrella invisible (es decir, como si fuera la mitad de un sistema estelar binario), podemos especular con la idea de que realmente gira en torno a una estrella invisible y que este invisible compañero es un agujero negro.

La búsqueda de agujeros negros se ha convertido, naturalmente, en la búsqueda de esos dos fenómenos. En 1970, el satélite Uhuru localizó estas dos manifestaciones en una zona. Registró una fuente de rayos X de alta energía en la constelación del Cisne, que emitía millones de veces más energía que el sol. Esta fuente de alta energía de radiación electromagnética, que pasó a ser conocida como Cisne X-1, está muy cerca de una estrella azul supergigante. En la actualidad los científicos creen que este supergigante azul forma un sistema binario con el agujero negro Cisne X-1.

Cuando la estrella visible y el agujero negro invisible orbitan entre sí la supergigante azul es literalmente «chupada» por el agujero negro. El material que es arrancado de su superficie cae en el agujero negro a tremenda velocidad, emitiendo rayos X. Por increíble que nos parezca Cisne X-1, más de cien objetos similares han sido detectados en nuestra galaxia, la Vía Láctea, desde que se descubrió su existencia. Pese a que los agujeros negros requieren un esfuerzo máximo de nuestra imaginación, cada día son mayores las pruebas que indican que existen realmente.

Si los agujeros negros son lo que nosotros especulamos que son, todo lo que desaparezca en ellos reaparecerá en alguna parte. En ese caso, ¿es posible que en otros universos existan agujeros negros que estén «sorbiendo» materia de esos universos para enviarla al nuestro? Se trata de una posibilidad que debe ser considerada seriamente. Hay objetos en nuestro universo que parecen ser el reverso de los agujeros negros. Se llaman agujeros blancos (¡naturalmente!) Esos objetos son fuentes de radio quasi-estelares, o quasars, como se les llama abreviadamente.

Los quasars son fuentes de energía extraordinariamente intensas. Mu-

chos de ellos sólo tienen varias veces el diámetro de nuestro sistema solar y, sin embargo, emiten mayor cantidad de energía que toda una galaxia de 150.000 millones de estrellas. Algunos astrónomos creen que los quasars son los objetos más distantes jamás detectados y sin embargo su increíble brillantez nos permite verlos con toda claridad.

La relación entre los agujeros negros y los quasars es pura especulación, pero una especulación que nos deja mentalmente boquiabiertos. Muchos físicos, por ejemplo, especulan que los agujeros negros se tragan la materia de un universo y la arrojan a otro universo, o a otro lugar y otro tiempo del mismo universo. De acuerdo con esa hipótesis el punto de «expulsión» de un agujero negro es un quasar. Si esta hipótesis fuera correcta, nuestro universo está siendo absorbido por sus numerosos agujeros negros sólo para reaparecer en otros universos, mientras que otros universos están siendo arrastrados a sus propios agujeros negros para reaparecer en el nuestro y de nuevo volver a ser sorbidos por nuestros agujeros negros y reaparecer en otros universos. Ese proceso continúa y continúa alimentándose de sí mismo. Otra danza sin principio ni fin, infinita y sin comienzo.

Uno de los subproductos más profundos de la teoría general de la relatividad es el descubrimiento de que la fuerza de gravitación, que durante tanto y tanto tiempo se creyó era una entidad real e independiente con existencia propia, no es más que una creación de la mente.

No existe nada semejante en el mundo real. Los planetas no recorren sus órbitas girando en torno al sol porque el sol ejerza sobre ellos una invisible fuerza gravitacional, sino que siguen los caminos que trazan sus órbitas, porque son el camino más fácil para atravesar el terreno del continuo espacio-tiempo en que se encuentran.

Lo mismo puede decirse de la «insensatez»: es una creación de la mente. No hay una cosa así en el mundo real. Desde un determinado marco de referencia los «agujeros negros» y «el horizonte suceso» tienen sentido. Nada es «insensato» excepto cuando es visto desde otra perspectiva, desde otro punto de vista.

Llamamos insensatez a algo que no está de acuerdo con las construcciones racionales que hemos edificado cuidadosamente. Sin embargo, no hay nada que sea intrínsecamente valioso en esas construcciones. De hecho, en muchas ocasiones ellas mismas se sustituyen por otras más útiles. Cuando eso ocurre, lo que resultaba insensato (es decir, carente de sentido) visto desde un sistema de referencia anticuado, visto desde otro marco de referencia puede parecer sensato. Y lo mismo sucede a la inversa.

Al igual que son relativas las mediciones de espacio y tiempo, el concepto de la insensatez (que es en sí también una forma de medición) es relativo. Y podemos estar seguros, en cualquier caso, que cuando lo empleemos en ciertos marcos de referencia adquirirá sentido y podrá tener aplicación en nosotros.

ME AFERRO A MIS IDEAS

EL ZOO DE LAS PARTÍCULAS

La cuarta traducción de «Wu Li» es «Me aferro a mis ideas». Es muy apropiada para un libro de física, dado que la historia de la ciencia por lo general fue la historia de unos científicos que luchaban valerosamente contra el asalto de nuevas ideas. Al aferrarse así a sus viejas ideas lo hicieron porque les resultaba difícil apartarse de ese sentimiento de seguridad que procede de un entendimiento largo y gratificador con un determinado concepto del mundo.

El valor de una teoría física depende de su utilidad. En este sentido, podría decirse que la historia de las teorías físicas se parece a la recopilación de rasgos individuales para dar forma a una personalidad. La mayor parte de nosotros respondemos a los impulsos de lo que nos rodea mediante una colección de respuestas automáticas que, alguna vez, produjeron los resultados deseados por nosotros, principalmente en la infancia. Desgraciadamente, si el ambiente que produce esas respuestas cambia (nosotros crecemos), y las respuestas dejan de adaptarse a esos cambios, éstas se vuelven contraproducentes. Mostrarse colérico, sentirse deprimido, halagar, gritar o amenazar, son formas de conducta, pautas de respuesta, que pertenecen a tiempos pasados. Pero nosotros únicamente cambiamos estos modelos de conducta cuando nos damos cuenta de que ya han dejado de ser productivos, útiles. E incluso en esos casos el cambio es lento, doloroso. Lo mismo puede aplicarse a las teorías científicas.

Nadie, excepto el propio Copérnico, quiso aceptar la idea copernicana de que la tierra giraba en torno al sol. Al referirse a la revolución puesta en marcha por la teoría de Copérnico, Goethe escribió:

> «Tal vez jamás se le planteó una exigencia mayor a la humanidad que esa de admitir que la tierra no era el centro del universo. Con ella, ¿qué era lo que se derrumbaba entre una nube de polvo y de humo?: un segundo paraíso, un mundo de inocencia, poesía y piedad, el testimonio de los sentidos y las convicciones de una fe poética y religiosa. No cabe extrañarse de que los seres humanos no tuvieran valor para aceptar todo eso y se alinearan, como un solo hombre, contra semejante doctrina...»[1]

Ni un solo físico, ni siquiera el propio Planck, quiso aceptar las implicaciones y las consecuencias de les descubrimientos de Planck, puesto que amenazaban a una estructura científica (la física de Newton), que contaba con más de trescientos años. Al referirse a la revolución provocada por el quanto, Heisenberg escribió:

> «... cuando nuevos grupos de fenómenos obligan a cambios en las pautas conceptuales... incluso el físico más eminente tropieza con inmensas dificultades. La exigencia de un cambio en las pautas del pensamiento puede engendrar en nosotros la sensación de que le quitan a uno el suelo de debajo de los pies... Creo que las dificultades en este punto difícilmente pueden ser exageradas. Una vez que se ha experimentado la desesperación con la que reaccionan los hombres de ciencia, inteligentes y conciliadores, cuando se les exige un cambio en la pauta de sus pensamientos, sólo cabe el sorprenderse de que tales revoluciones de la ciencia hayan sido posibles».[2]

Las revoluciones científicas nos llegan forzadas por descubrimientos de fenómenos que no resultan comprensibles en términos de las antiguas teorías. Éstas resultan difíciles de eliminar, pues hay en juego muchas cosas, además — y por encima — de las propias teorías. Ceder nuestra posición privilegiada en el centro del universo, como Copérnico nos pedía, era una carga sicológica enorme. Aceptar que la naturaleza es irracional (gobernada por el azar), y ésta es la declaración esencial de la mecánica cuántica, significó un duro golpe para el intelecto. Pese a ello, a medida que las nuevas teorías demostraron su superior utilidad, sus adversarios, aunque fuera a disgusto, no tuvieron más remedio que aceptarlas. Al hacerlo así aseguraron el que los conceptos que las acompañaban fueran igualmente reconocidos.

En la actualidad, los aceleradores de partículas, las cámaras de burbujas y las unidades periféricas de las computadoras, han dado a luz un nuevo concepto del mundo que es tan distinto del que se tenía a principios de este siglo como el de Copérnico lo era de sus predecesores. Estos nuevos conceptos exigen el abandono de muchas de las ideas a las que nos aferrábamos con tanto ardor.

En este nuevo concepto del mundo no existe la sustancia.

La pregunta más corriente que solemos hacer sobre un objeto es: «¿De qué está hecho?» Esta pregunta está basada en una estructura mental artificial que es más bien como una galería de espejos. Si nos quedamos de pie directamente entre dos de ellos y miramos a uno de los espejos vemos nuestra imagen reflejada y, exactamente detrás de nosotros, toda una multitud de *nosotros,* cada uno de ellos mirando a la parte de atrás de la cabeza que tiene delante de él. Esta imagen multitudinaria se extiende, hacia atrás, en todo lo que podemos ver. Estos reflejos, todos ellos, son ilusiones. La única cosa real en todo este escenario somos *nosotros.*

La situación es muy similar a lo que sucede cuando preguntamos de qué está hecho algo. La respuesta a esa cuestión es siempre algo a lo que podemos aplicar la misma pregunta.

Supongamos, por ejemplo, que preguntamos, refiriéndonos a un corriente palillo de dientes: «¿De qué está hecho?» La respuesta, naturalmente, está clara: «De madera.» Sin embargo, la cuestión nos ha llevado al salón de los espejos porque ahora podemos preguntar, refiriéndonos a la madera: «¿De qué está hecha?» Un examen más próximo nos revela que está hecha de fibras, pero otra cuestión es de qué están hechas las fibras, y así sucesivamente.

Como un par de espejos paralelos, que reflejan las imágenes reflejadas, y que dan la sensación de una infinita progresión que no lleva a ninguna parte, la idea de que una cosa puede ser diferente de aquello de lo que está hecha crea una progresión ilimitada de respuestas que nos deja frustrados para siempre en una búsqueda sin fin. No importa de qué esté hecho algo — todo —, hemos creado una ilusión que nos fuerza a preguntar: «Sí, ¿pero de qué está hecho *eso*?»

Los físicos son gentes que han venido persiguiendo tenazmente esta infinita serie de cuestiones. Y lo que han hallado es sorprendente. Las fibras de madera, para continuar el ejemplo, son realmente agrupaciones de células. Las células, vistas con el necesario aumento, descubren ser agrupaciones de moléculas. Bajo un aumento mayor, las moléculas descubren que son agrupaciones de átomos y, por último, los átomos, así se ha demostrado, son agrupaciones de partículas subatómicas. En otras palabras, «materia» es una serie de agrupaciones o *modelos fuera de foco.* La búsqueda de la sustancia definitiva del universo termina con el descubrimiento de que *no existe ninguna.*

Si hay una última sustancia constitutiva del universo es la pura energía, porque las partículas subatómicas no están *hechas* de energía sino que *son* energía. Esto es lo que Einstein afirmó en 1905. Las interacciones subatómicas son, en consecuencia, interacciones de energía con energía. A nivel subatómico no hay una diferenciación clara entre lo que es y lo que ocurre, entre el actor y la acción. A nivel subatómico el bailarín y el baile son una misma cosa.

De acuerdo con la física de las partículas, el mundo es fundamentalmente energía danzante; lo que hemos venido llamando materia (partículas), está siendo creado y aniquilado continuamente; y vuelto a crear. Esto es lo que ocurre cuando las partículas interaccionan entre ellas y sucede, literalmente hablando, saliendo de la nada.

Donde no había «nada» de repente hay «algo» y seguidamente ese algo vuelve a marcharse, frecuentemente transformándose en algo distinto antes de desvanecerse. En la física de las partículas no hay diferencia entre vacío o no-vacío, o entre algo y «no-algo» (nada). El mundo de la física de las partículas es un mundo de energía chispeante, danzando para siempre consigo misma en la forma de sus partículas al encenderse y al apagar-

se dentro y fuera de la existencia, chocando entre sí, transmutándose y desapareciendo de nuevo.

El concepto del mundo de la física de las partículas es una imagen de *caos por debajo del orden*. A nivel fundamental es una confusión en la que se mezclan creación, aniquilación y transformación de manera continuada. Por encima de esta confusión, limitando sus formas posibles, hay una serie de leyes de conservación (pág. 164). Estas leyes no especifican lo que tiene que suceder, como suelen hacer las leyes comunes de la física, sino que más bien determinan lo que *no* puede suceder. Son leyes permisivas. A nivel subatómico todo aquello, absolutamente todo, que no esté prohibido por las leyes de conservación puede suceder en realidad. (La teoría del quanto describe las probabilidades de las posibilidades permitidas por las leyes de conservación).

Como escribió Jack Sarfatti:

> «Las partículas no siguen moviéndose rígida y formalmente, ni majestuosas, siguiendo sendas determinadas. Más bien son un pandemónium hipercinético de los Hermanos Marx, del girar del bastón de Charlie Chaplin, algo que está y no está, que se ve y, un momento después, deja de verse. En realidad, ni está claro qué es lo que sigue una trayectoria. Todo es confusión sicodélica... hasta que se descubre el sutil orden.»[3]

La antigua imagen del mundo era una imagen de *orden debajo del caos*. Se presumía que bajo la prolífica confusión de detalles que constituye nuestra experiencia diaria, existían leyes sistemáticas y racionales que relacionaban al individuo con el todo. Ése fue el gran descubrimiento de Newton: las mismas leyes que rigen la caída de las manzanas rigen el movimiento de los planetas. Todavía sigue habiendo bastante verdad en ello, pero el concepto del mundo de la física de las partículas es esencialmente lo contrario. El mundo de la física de las partículas es un mundo sin materia donde lo que es es igual a lo que ocurre, y donde se desarrolla una infinita y tumultuosa danza de creación, aniquilación y transformación incesantes, dentro del marco de las leyes de conservación y de probabilidad.

La física de las partículas de alta energía es el estudio de las partículas subatómicas. Usualmente su nombre se abrevia y se la llama «física de las partículas». Mientras que las herramientas materiales consisten en unos equipos inimaginablemente costosos de aceleradores y ordenadores, la teoría cuántica y la de la relatividad son las herramientas teóricas de la física de las partículas.

El propósito original de la física de las partículas es descubrir el ladrillo básico usado en la construcción del universo. Esto debía conseguirse rompiendo la materia en trozos cada vez más pequeños hasta llegar a lograr el trozo más pequeño posible. El resultado experimental de la física de las partículas no ha sido tan simple. En la actualidad, la mayor parte de

los físicos de las partículas se ocupan en tratar de dar sentido a sus copiosos hallazgos.*

En principio, la física de las partículas difícilmente podría ser más sencilla. Los físicos lanzan partículas subatómicas para que choquen entre sí con toda la fuerza posible. Utilizan una partícula para hacer añicos a otras y ver qué queda de ellas y de qué están hechos estos restos. La partícula que provoca el choque se llama el proyectil y las partícula que debe ser destrozada es el blanco. Los aceleradores de partículas más avanzados (y más costosos) lanzan ambas partículas, el proyectil y el blanco, para que se encuentren en un punto común llamado punto de colisión o de choque.

El punto de choque está, por lo general, situado dentro de un aparato que se llama una cármara de burbujas. Una partícula con carga que se mueve a través de una cámara de burbujas deja un rastro semejante al que deja un avión a reacción cuando vuela en la atmósfera. La cámara de burbujas está situada dentro de un campo magnético. Esto hace que las partículas que tienen carga positiva se curven en una dirección y las que tienen carga negativa en la dirección opuesta. La masa de la partícula puede ser determinada por la forma, más o menos cerrada, de la curva descrita por la partícula (las partículas ligeras se curvan más que las partículas pesadas, con la misma velocidad y carga). Una cámara accionada automáticamente por una computadora toma una fotografía cada vez que una partícula penetra en la cámara de burbujas.

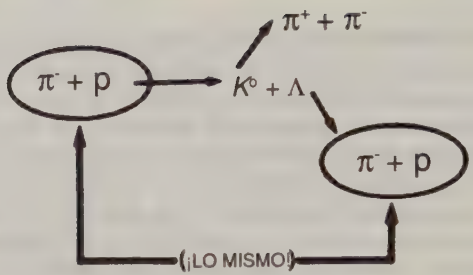
Todos estos complicados preparativos son necesarios porque la mayor parte de las partículas viven menos de una millonésima de segundo y son demasiado pequeñas para poder ser observadas directamente.** En términos generales, todo lo que un físico especializado sabe sobre las partículas subatómicas lo deduce de sus teorías y de las fotografías de las trazas que las partículas dejan en la cámara de burbujas.

Miles y miles de fotografías tomadas en la cámara de burbujas muestran claramente lo incómodo y frustrador de la posición en que se encuentran los físicos especializados en partículas, en su búsqueda de las partículas «elementales». Cuando el proyectil choca con el blanco, ambas partículas quedan destrozadas en el punto del impacto. ¡En su lugar, sin embargo, son creadas *nuevas* partículas, todas las cuales son tan «elementales» como las partículas originales y, frecuentemente, tan básicas como las partículas originales!

Este diagrama esquemático nos muestra una típica interacción entre partículas. Una partícula llamada un mesón pi negativo (π^-) choca con un protón (p). Tanto el mesón pi como el protón son destruidos y en su lugar

* El estado presente de la teoría de la alta-energía es semejante al de la astronomía de Ptolomeo antes de que se derrumbara por la presión del nuevo concepto de Copérnico. El descubrimiento de nuevas partículas y nuevos números cuánticos, a los que nos referiremos posteriormente, es análogo a la suma de los epiciclos acumulados sobre una estructura teórica ya demasiado sobrecargada.

** El ojo adaptado a la oscuridad puede detectar fotones aislados. Todas las demás partículas subatómicas tienen que ser detectadas indirectamente.



se crean dos nuevas partículas, un mesón K neutro (K°) y una partícula lambda (Λ). Estas dos partículas se desintegran espontáneamente (no es necesaria la colisión) en dos partículas adicionales, dejando, pues, cuatro partículas. ¡De esas cuatro partículas dos son las mismas con que comenzamos! Como escribió Finkelstein, es como si tomáramos dos relojes, los machacáramos haciéndolos chocar entre sí y de ellos salieran volando no las ruedas y las cuerdas, sino más relojes y, algunos de ellos, tan grandes como los originales.

¿Como puede suceder una cosa así? La teoría especial de la relatividad de Einstein nos da una respuesta parcial. *Las nuevas partículas son creadas por la energía cinética (energía de movimiento) de la partícula proyectil,* sumada a su propia masa más la masa de la partícula blanco. Mientras más rápidamente se desplace la partícula proyectil, de mayor cantidad de energía cinética se dispondrá para crear nuevas partículas en el punto del impacto. Ésta es la razón por la cual los gobiernos vienen gastando más y más dinero para construir aceleradores de partículas cada vez mayores y más potentes que puedan impulsar las partículas a velocidades cada vez mayores. Si ambas partículas, el proyectil y el blanco, son aceleradas hasta llegar al punto de impacto, se dispondrá de mayor cantidad de energía cinética para crear nuevas partículas y someterlas a estudio.

Toda interacción subatómica consiste en la aniquilación de las partículas originales y la creación de nuevas partículas subatómicas. El mundo subatómico es una danza continuada de creación y aniquilación, de masa que se transforma en energía y de energía que se transforma en masa.* Formas transitorias centellean dentro y fuera de la existencia creando una realidad nunca limitada y siempre creada de nuevo.

* El dualismo masa/energía de nuestros conceptos ordinarios no existe en el formalismo de las teorías cuántica o de la relatividad. Según Einstein, $E = mc^2$, la masa no se transforma en energía o viceversa: energía es masa. Doquiera que está presente energía, E, está presente masa, m, y esa cantidad de masa está dada por la ecuación $E = mc^2$. La cantidad total de energía, E, se conserva y, por consiguiente, la cantidad total de masa, m, se conserva también. Esta masa, m, está definida por el hecho de que es una fuente de energía gravitatoria.

Los místicos, tanto los de Occidente como los de Oriente, que proclaman haber visto «el rostro de Dios», hablan en términos tan parecidos a éstos que cualquier sicólogo que muestre interés en estados de conciencia alterados difícilmente podrá ignorar este notorio puente que une las disciplinas de la física y la sicología.

La primera pregunta de la física de las partículas es: «¿Qué es lo que choca?»

Según la mecánica cuántica una partícula subatómica no es una partícula semejante a una partícula de polvo. Más bien puede decirse que las partículas subatómicas son «tendencias a existir» (pág. 51) y «correlaciones entre observables macroscópicos» (pág. 86). No tienen existencia objetiva. Esto significa que no podemos suponer, si vamos a emplear la teoría cuántica, que las partículas tengan una existencia aparte de sus interacciones con los instrumentos de medida (pág. 107). Como escribió Heisenberg:

> «A la luz de la teoría cuántica... las partículas elementales no son reales en el sentido que lo son los objetos de la vida diaria, árboles o piedras...»[4]

Por ejemplo, cuando un electrón pasa por una placa fotográfica deja una «huella» visible tras él. Esta «traza», observada de cerca y con todo detalle demuestra ser una serie de puntos grandes. Cada uno de ellos es un grano de plata formado por la interacción del electrón con los átomos en la placa fotográfica. Visto al microscopio, el rastro dejado por la partícula presenta un aspecto parecido a éste.

Normalmente cabría pensar que un único electrón, como si fuera una diminuta pelota de béisbol, pasó a saltitos por la superficie de la placa fotográfica y dejó tras sí esta traza de granos de plata. Esto es un error. La mecánica cuántica nos dice lo mismo que los budistas tántricos vienen diciendo desde hace un milenio. *La conexión entre los puntos (el «objeto móvil») es un producto de nuestra mente* y realmente no está allí. En términos rigurosos de la mecánica cuántica el objeto en movimiento — la partícula con una existencia independiente — es una suposición que no puede ser probada.

> «Según nuestro acostumbrado modo de razonar — escribió David Bohm, un profesor de física de Birkbeck College, Universidad

de Londres — podríamos suponer que la traza de los granos de plata indica que un electrón real se mueve continuamente en el espacio, siguiendo una trayectoria próxima a los granos que ha formado mediante su interacción. Pero según la interpretación normal de la teoría cuántica sería incorrecto suponer que eso es lo que realmente ocurre. Todo lo que podemos decir es que han aparecido ciertos granos, pero no debemos imaginar que han sido producidos por un objeto real que se mueve por el espacio del modo como usualmente creemos que los objetos se mueven por el espacio. Pese a que esta idea de un objeto moviéndose continuamente por el espacio es lo suficientemente buena para una teoría aproximada, descubriremos que no tendría consistencia en una teoría muy exacta.»[5]

La hipótesis natural de que objetos como «partículas» son cosas reales que siguen su curso en el espacio y el tiempo, de acuerdo con leyes causales, independientemente de que estemos cerca para observarlos o no, es repudiada por la mecánica cuántica. Esto resulta especialmente significativo porque la mecánica cuántica es *la teoría* de la física. Ha explicado con éxito todo, desde las partículas subatómicas a los fenómenos estelares. Nunca hubo una teoría con mayor éxito. No tiene rival.

Por consiguiente, cuando observamos las trazas dejadas en una cámara de burbujas, nos quedamos con la pregunta «¿Quién las ha hecho?» La mejor respuesta que los físicos han conseguido hasta ahora es que las «partículas» son interacciones entre campos. Un campo, como una onda, se extiende sobre una zona mucho más amplia que la que ocupa una partícula (una partícula está restringida a un punto). Más aún: un campo llena por completo un espacio dado, como por ejemplo el campo gravitatorio de la tierra llena todo el espacio que la rodea inmediato a ella.

Cuando dos campos interaccionan entre sí lo hacen no de modo gradual ni tampoco en todas las zonas de contacto. Lo hacen de *modo instantáneo* y en un solo punto del espacio («instantáneamente y localmente»). Estas interacciones instantáneas y locales hacen lo que nosotros llamamos partículas. De hecho, según esta teoría, *son* partículas. La creación y aniquilación continuas de partículas a nivel subatómico es el resultado de una interacción continuada entre diferentes campos.

Esta teoría es llamada teoría cuántica de campos. Algunos de los pilares básicos de esta teoría fueron puestos por el físico inglés Paul Dirac. La teoría cuántica de campos ha tenido mucho éxito en la predicción de nuevos tipos de partículas y en la explicación de las existentes en términos de interacciones de campos. De acuerdo con esta teoría un campo, separado, está asociado a cada tipo de partícula. Dado que en 1928 solamente se conocían tres tipos de partículas, sólo se requería la existencia de tres campos diferentes para explicarlas. El problema en la actualidad es que ya se conocen más de un centenar de partículas, lo que, de acuerdo con la teoría cuántica de campos requeriría la existencia de más de cien distintos campos. Esta abundancia de campos teóricos no sólo asusta sino

que resulta un tanto embarazosa para los físicos, cuya meta es simplificar la naturaleza. Por consiguiente, la mayor parte de los físicos han decidido renunciar a la idea de que para cada tipo de partícula existe un campo separado.

Pese a todo eso, la teoría cuántica de campos sigue siendo una teoría importante, no sólo porque resulta efectiva en la práctica, sino también porque es la primera teoría que funde la mecánica cuántica y la relatividad, aunque sea de manera limitada. Todas las teorías de la física, incluida la teoría cuántica, tienen que satisfacer los requerimientos de la teoría de la relatividad en el sentido de que las leyes físicas deben ser independientes del estado de movimiento del observador. Los intentos de integrar la teoría de la relatividad con la teoría cuántica han fracasado, por lo general, pese a lo cual ambas teorías son requeridas y utilizadas rutinariamente para la mejor comprensión de la física de las partículas. Esta relación mutua, forzada, se podría definir como tensa pero necesaria. En este aspecto, una de las teorías que con más éxito ha pretendido integrarlas ha sido la teoría cuántica de campos, pese a que abarca no sólo una gama relativamente pequeña de fenómenos.*

La teoría cuántica de campos es una teoría *ad hoc*. Esto quiere decir que, al igual que el famoso modelo del átomo de Bohr con sus órbitas específicas, es un esquema práctico pero conceptualmente inconsistente. Algunas de sus partes no se acomodan entre sí matemáticamente. Es un modelo de trabajo diseñado utilizando los datos disponibles para dar a los físicos un punto de partida para la exploración de los fenómenos subatómicos. La razón de que se haya mantenido tanto tiempo es que funciona. (Algunos físicos opinan que es efectiva en *demasía*. Temen que el triunfo pragmático de la teoría impida el desarrollo de una teoría auténticamente consistente.)

Incluso con esas limitaciones bien conocidas, el hecho es que se trata de una teoría física con éxito y se basa en la premisa de que *la realidad física es esencialmente no sustancial*. De acuerdo con ella lo único real son los campos. Ellos y no la «materia» son la sustancia del universo. La materia (partículas) es simplemente una manifestación momentánea de la interacción de los campos, intangibles e insustanciables, y que pese a ello son la única cosa real en el universo. Sus interacciones se semejan a las partículas porque los campos actúan entre sí de manera muy abrupta y en regiones del espacio extremadamente pequeñas.

«La teoría cuántica de campos» es, desde luego, una extrema contradicción en sus términos. Un quanto es un todo indivisible, una pequeña parte de algo, mientras que un campo es una área completa de algo. «Un campo cuántico» es una yuxtaposición de dos conceptos irreconciliables. En otras

* La teoría de la Matriz-S combina la teoría cuántica y la relatividad, pero ofrece una información limitada sobre los detalles de los fenómenos subatómicos y, corrientemente, está limitada a diversas interacciones (la teoría de la Matriz-S se explica en el próximo capítulo).

palabras, es una paradoja. Desafía a nuestro imperativo categórico de que algo es *esto* o *aquello,* pero no ambas cosas.

La contribución principal de la mecánica cuántica al pensamiento occidental, y hay muchas, es posible que sea su impacto en las categorías artificiales mediante las cuales estructuramos nuestras percepciones, puesto que las estructuras osificadas de la percepción son las prisiones en las cuales, sin saberlo, caemos prisioneros. La teoría cuántica declara, audazmente, que algo puede ser esto *y* aquello (una onda *y* una partícula).* Carece de sentido preguntar cuál de estas dos tesis es realmente la descripción fiel. Ambas se requieren para llegar a una comprensión completa.

En 1922, cuando todavía era estudiante, Werner Heisenberg le preguntó a su profesor, Niels Bohr, que más tarde llegaría a ser su amigo: «Si la estructura interna del átomo está tan próxima a los acontecimientos descriptivos como usted dice, si realmente nos falta un idioma para ocuparnos de ella, ¿cómo podemos tener la esperanza de llegar a comprender lo que es el átomo?»

Bohr vaciló por un momento antes de contestar:

«Creo que podremos estar en condiciones de hacerlo así. Pero en el proceso quizá tengamos que detenernos para aprender lo que realmente significa la palabra "comprender"».[6]

En términos humanos esto quiere decir que la misma persona puede ser buena *y* mala, audaz *y* tímida.

Pese a todo lo expresado anteriormente, los físicos de las partículas tienen necesidad de analizar las partículas subatómicas como si *fueran* pequeñas pelotas de béisbol que vuelan a través del espacio y colisionan entre sí. Cuando un físico especializado estudia la traza de una interacción de partículas obtenida en una cámara de burbujas, supone que fue hecha por un pequeño objeto en movimiento y que las otras huellas en la fotografía igualmente fueron trazadas por pequeños objetos móviles. De hecho las interacciones de la partícula son analizadas en general en los mismos términos que podrían ser aplicados al choque de bolas de billar. Algunas partículas chocan (y son aniquiladas en el proceso) y otras partículas de nueva creación escapan volando de la zona de choque. En resumen, las interacciones de la partícula son analizadas esencialmente en términos de masas, velocidades y momentos. Ésos son los conceptos de la física de Newton y se aplican, igualmente, a los automóviles y los tranvías.

Los físicos hacen esto porque tienen que usar esos conceptos si quie-

* El lenguaje de la teoría cuántica es preciso, pero engañoso. La teoría cuántica no proclama que algo —como la luz, por ejemplo— puede ser *al mismo tiempo* de naturaleza ondulatoria y corpuscular. De acuerdo con la complementariedad de Bohr (pág. 104) la luz revela un aspecto ondulatorio o un aspecto corpuscular según el contexto, es decir, el experimento. No es posible observar ambos aspectos en la misma situación. Sin embargo, *para entender la luz,* son necesarios ambos conceptos mutuamente exclusivos (complementarios). En ese sentido la luz es de naturaleza corpuscular y de naturaleza ondulatoria.

ren comunicarse. Lo único de que disponen, generalmente, es de una fotografía negra con líneas blancas sobre ella. Los físicos saben que: (1) de acuerdo con la teoría cuántica, las partículas subatómicas no tienen por sí mismas existencia independiente; (2) las partículas subatómicas tienen características ondulatorias y características corpusculares (de partícula), y (3) las partículas subatómicas pueden ser realmente manifestaciones de campos interactuantes. Sin embargo, esas líneas blancas (más modelos) conducen, en sí mismas, a análisis en términos clásicos y es así como los físicos especialistas en el estudio de las partículas las analizan.

Este dilema, el dilema de tener que hablar en términos clásicos sobre fenómenos que no pueden ser descritos en conceptos clásicos, es la paradoja básica de la mecánica cuántica. Se extiende por toda ella. Es como tratar de explicar una experiencia con LSD. Tratamos de usar conceptos familiares como puntos de partida, pero más allá de eso los conceptos familiares no concuerdan con los fenómenos. La alternativa sería no decir nada en absoluto.

Heisenberg escribió:

> «Los físicos que se ocupan de la teoría cuántica están obligados a utilizar un lenguaje tomado de la vida ordinaria. Actuamos como si realmente existiera una cosa, como una corriente eléctrica (o una partícula), porque si prohibimos a todos los físicos que hablen de corrientes eléctricas (o partículas) no podrían seguir expresando sus pensamientos.»[7]

De modo que los físicos hablan de partículas subatómicas como si fueran pequeños objetos reales que dejan su rastro en una cámara de burbujas y tienen una existencia independiente («objetiva»). Esta decisión ha sido extremadamente productiva. En el transcurrir de los últimos cuarenta años se han descubierto casi cien partículas distintas. Esto constituye lo que Kenneth Ford llama el zoo de las partículas.*

La primera cosa que hay que saber sobre el zoo de las partículas es que todas las partículas de la misma especie tienen exactamente el mismo aspecto. Cada electrón es exactamente igual a los otros electrones. Cuando se ha visto uno se han visto todos. Del mismo modo, cada protón tiene exactamente el mismo aspecto que cualquier otro protón, y lo mismo se aplica al neutrón, y así sucesivamente. Las partículas subatómicas del mismo tipo son absolutamente indistinguibles entre sí.

Las partículas subatómicas de distintos tipos, sin embargo, pueden ser reconocidas por sus distintas características (propiedades). La primera de las características diferenciales de una partícula subatómica es su masa. Un protón, por ejemplo, tiene una masa que es 1.800 veces superior a la

* Uno de los mejores libros populares sobre la física de las partículas es *The World of Elementary Particles*, por Kenneth Ford, New York, Blaisdell, 1965.

de un electrón. (Esto no significa, necesariamente, que un protón sea 1.800 veces mayor que un electrón, puesto que masa y tamaño no son la misma cosa: un kilo de plomo y un kilo de plumas, tienen la misma masa.)

Cuando los físicos se refieren a la masa de una partícula, salvo que indiquen lo contrario, se están refiriendo a la masa de la partícula cuando se halla en estado de reposo. Esta masa se llama masa de reposo. Cualquier otra masa que no sea esta masa en reposo, se llama masa relativista. Dado que la masa de una partícula se incrementa con la velocidad, una partícula puede tener cualquier número de masas relativistas. El tamaño de la masa relativista de una partícula depende de su velocidad. Por ejemplo, al 99 por ciento de la velocidad de la luz la masa de una partícula es siete veces mayor que cuando esa misma partícula está en reposo.

A velocidades superiores al 99 por ciento de la velocidad de luz las masas de las partículas se incrementan de manera realmente espectacular. Cuando seguía funcionando el anterior acelerador de electrones de Cambridge, Massachusetts, recibía los electrones del pequeño acelerador suministrador que los entregaba al acelerador principal al 0,99986 de la velocidad de la luz. El acelerador principal, seguidamente, incrementaba esta velocidad hasta ponerla en el 0,999999996 de la velocidad de la luz. El incremento de velocidad puede parecer significativo, pero realmente es despreciable. La diferencia entre la velocidad inicial de los electrones acelerados y su velocidad final es la misma que la diferencia de velocidad entre un automóvil que puede hacer un recorrido determinado en dos horas y un automóvil más rápido que puede hacer el mismo recorrido en una hora, cincuenta y nueve minutos y cincuenta y nueve segundos.[8]

Sin embargo, la masa de cada electrón se incrementa y de 60 veces la masa en reposo, que tenía al entrar en el acelerador principal, pasa a tener 11.800 veces esa misma masa. En otras palabras, los aceleradores de partículas tienen un nombre poco adecuado, erróneo. No incrementan las velocidades de las partículas subatómicas (ésta es la definición de la aceleración) en la misma medida que lo hacen con su masa. Los aceleradores de partículas son en realidad «agrandadores» de partículas (¿masificadores?)

Las masas de las partículas, tanto en reposo como en movimiento, se miden en electronvoltios.* Un electronvoltio no tiene nada que ver con los electrones, sino que es una unidad de *energía*. (Es la energía adquirida por cualquier partícula con carga unidad que pasa a través de una diferencial de potencial de un voltio.) La cuestión estriba en que al medir algo en términos de electronvoltios es medir su *energía* y, realmente, ésta es la medida que los físicos especializados en el estudio de las partículas utilizan para medir la *masa* de una partícula. Por ejemplo, la masa en reposo de un electrón es 0,51 millones de electronvoltios (Mev) y la masa en reposo de un protón es 938,2 millones de electronvoltios. La transformación de masa en energía y de energía en masa es un fenómeno tan rutinario entre los físicos especializados en las partículas, que estos científicos

* O electronesvoltio.

emplean unidades de energía para designar la masa de una partícula.

La masa es sólo una forma particular de la energía (pág. 163), la energía de ser. Si una partícula está en movimiento, no sólo tiene energía de ser (su masa), sino que posee además energía de movimiento (energía cinética). Ambos tipos de energía pueden ser utilizados para crear nuevas partículas en una colisión de partículas.*

Frecuentemente resulta más sencillo expresar la masa de una partícula con referencia a la partícula de masa más ligera, el electrón, en vez de hacer referencia al número de electronvoltios que contiene. Esta norma hace que se considere la masa del electrón como la unidad (uno) y la masa de un protón, por ejemplo, 1.836,12 unidades. Utilizando este sistema, la masa de una partícula nos dice, inmediatamente, cuántas veces es más pesada que un electrón.

Cuando los físicos hicieron una relación de las partículas conocidas en orden a sus masas, de la más ligera a la más pesada, descubrieron que las partículas subatómicas pueden clarificarse, en términos generales, en tres categorías: las partículas de peso ligero, las partículas de peso medio y las partículas de peso pesado. Sin embargo, a la hora de poner nombre a esas categorías vuelven a caer en el griego, como era lógico esperar. El grupo de las partículas de peso ligero recibe el nombre de «leptones», lo que en griego significa «las ligeras». El grupo intermedio, el de las partículas de peso mediano, es llamado «mesones», que en ese mismo idioma quiere decir «las de tamaño mediano». Finalmente, el último grupo, el de las partículas pesadas ha sido bautizado con el nombre de los «bariones», que en griego es el equivalente de «las pesadas». Por qué razón los físicos no llaman a esos nuevos grupos «ligero», «medio» y «pesado» es una de las cuestiones de la física nunca tendrán respuesta.**

Dado que el electrón es la partícula material más ligera, es un leptón. El protón es una partícula de peso pesado (un barión), pese a ser la más ligera de las partículas de este grupo de peso pesado. La mayor parte de las partículas subatómicas están clasificadas de este modo, pero no todas ellas, lo cual nos conduce a un fenómeno de la física de las partículas que, muy semejante a la mecánica cuántica, escapa a los límites del concepto.

* La fórmula de Einstein $E = mc^2$, dice que masa es energía y que energía es masa. De modo que, hablando con precisión la masa no es una forma particular de la energía. *Toda forma de energía es masa.* La energía cinética, pongamos por ejemplo, es masa. Si aceleramos una partícula (le damos mayor velocidad) por supuesto le damos energía, ΔE, gana masa, Δm, en exactamente la cantidad requerida: $\Delta E = (\Delta m)\ c^2$. Allí donde está la energía, está la masa.

** Los físicos, cuando usan los términos leptón, mesón y barión, se refieren a algo más que a la masa de las partículas. Esos términos se refieren, en la actualidad, a clases de partículas que están definidas por varias propiedades, además de la masa. Por ejemplo, la partícula *tau* (T) que fue descubierta por un equipo conjunto perteneciente al Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) y al Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), en 1975, parece ser un leptón, pese a que ¡tienen mayor masa que el más pesado de los bariones! De manera similar las partículas D, descubiertas por ese equipo conjunto SLAC/LBL (en el año 1976), son mesones, pese a tener mayor masa que las partículas *tau*.

Hay algunas partículas que no pueden ser situadas dentro del marco de la clasificación leptón-mesón-barión. Algunas de ellas son bien conocidas (como el fotón). Otras han sido halladas sólo de una manera teórica y todavía no han sido descubiertas en la práctica (como el gravitón). Todas ellas tienen en común el hecho de que son *partículas sin-masa.*

—¡Un momento! — exclamamos —. ¿Qué es una partícula sin masa?

—Una partícula sin masa — dice Jim de Wit, que ha estudiado el fenómeno — es una partícula que tiene masa cero en reposo. Toda su energía es energía cinética. Cuando se crea un fotón, instantáneamente se pone a viajar a la velocidad de la luz. No puede conseguirse que su velocidad sea menor (porque no tiene masa a la que hacer ir más despacio), ni tampoco puede ser acelerado (nada puede desplazarse a velocidad mayor que la de la luz).

«Partícula sin masa» es una terrible traducción del idioma matemático al castellano. Los físicos saben exactamente lo que quieren decir con la definición «partícula sin masa». Es el nombre que dan a un elemento en una estructura matemática. Lo que ese elemento representa en el mundo real, sin embargo, ya no es tan fácil de describir. De hecho es imposible porque la definición de un objeto (como una «partícula») es la de algo que tiene masa.

Los budistas Zen han desarrollado una técnica llamada el *koán* que, conjuntamente con la meditación, produce cambios en nuestra percepción y comprensión. Un *koán* es un rompecabezas, un jeroglífico al que no se puede responder de manera ordinaria porque es paradójico. «¿Qué es el sonido de una palmada dada con una sola mano?» es un *koán* del Zen. A los estudiantes de Zen se les pide que piensen incesantemente en un determinado *koán* hasta que logren dar con la respuesta. No hay una única respuesta correcta a un *koán.* La respuesta depende del estado sicológico del estudiante.

Las paradojas son algo común en la literatura budista. Las paradojas son los lugares con los que tropieza nuestra mente racional en sus propias limitaciones. Según la filosofía oriental, en general, los opuestos tales como bueno-malo, guapo-feo, nacimiento-muerte, etc., son distinciones falsas. Las unas no pueden existir sin las otras. Son estructuras mentales creadas por nosotros. Estas ilusiones, creadas y mantenidas en sí mismas, son la causa única de la paradoja. Escapar a los lazos de las limitaciones conceptuales es oír el sonido de una palmada dada con una sola mano.

La física está repleta de *koans.* Por ejemplo: representar una partícula sin masa. ¿Es una coincidencia que los budistas al explorar la realidad «interna», hace mil años, y los físicos al explorar la realidad «externa», un milenio después, descubrieran que «comprender» requiere pasar la barrera de una paradoja?

La segunda característica de una partícula subatómica es su carga. Cada partícula subatómica tiene una carga positiva, negativa o neutra. Su carga determina cómo se conducirá una partícula en relación con y en presencia

de otras partículas. Si una partícula tiene una carga neutra, es de todo punto indiferente para las otras partículas cualquiera que sea la carga que tengan estas últimas.

Las partículas con carga positiva o negativa, sin embargo, se comportan de manera distinta entre sí. Las partículas con carga positiva o negativa se sienten atraídas por partículas con carga opuesta y repelidas por las que tienen el mismo signo. Dos partículas con carga positiva ambas, encuentran su compañía realmente repulsiva y, de inmediato, ponen entre ellas la mayor distancia posible. Lo mismo puede aplicarse a las partículas con cargas negativas. Por otra parte, una partícula con carga negativa y otra con carga positiva, se sienten irresistiblemente atraídas entre ellas y de inmediato se mueven para acercarse todo lo que puedan.

Esta danza de la atracción y la repulsión entre partículas cargadas se llama fuerza electromagnética. Permite que los átomos se unan entre sí, para formar moléculas, y mantienen en órbita a los electrones con carga negativa en torno a un núcleo con carga positiva. A nivel atómico y molecular puede decirse que esta fuerza es la «cola» fundamental que pega al universo.

La carga eléctrica se presenta solamente en una cantidad limitada. Una partícula subatómica puede no tener carga eléctrica (neutra) o una unidad de carga eléctrica (bien positiva o bien negativa), o en ciertas ocasiones dos unidades de carga eléctrica, pero nada intermedio. No hay algo así como una partícula con una y cuarto unidades de carga eléctrica o con 1,7 unidades de carga eléctrica. Toda partícula subatómica tiene una unidad completa de carga eléctrica (o dos unidades completas) o no tiene carga en absoluto. En otras palabras, al igual que la energía (el descubrimiento de Planck) la carga eléctrica está «cuantificada». Se presenta en bloques, en piezas completas. En el caso de la energía eléctrica todos los quantos son del mismo tamaño. El por qué es así es una de *LAS* preguntas que todavía no han tenido respuesta en física.* Cuando la característica de carga se suma a la característica de masa comienza a surgir (permítasenos decirlo así) la personalidad de una partícula. Un electrón, por ejemplo, es la única partícula subnuclear con una masa en reposo de 0,51 millón de electronvoltios y carga negativa. Con esa información un físico especializado en el estudio de las partículas puede saber no sólo la masa de un electrón sino, también, cómo interactuará con otras partículas.

La tercera característica de una partícula subatómica es su espín (giro). Las partículas subnucleares giran en torno a una especie de eje teórico, como si fueran una peonza. Hay, no obstante, una gran diferencia entre una peonza y una partícula en giro: una peonza puede girar más de prisa o más despacio, pero una partícula subatómica *siempre* girará exactamente a la misma velocidad. Cualquier electrón gira siempre a exactamente el

* Este aspecto peculiar de la carga eléctrica parece estar relacionado con las propiedades del «quark» y/o las propiedades de los monopolos magnéticos.

mismo número de revoluciones que cualquier otro electrón.

El espín es una característica fundamental de las partículas subatómicas hasta tal punto que si es alterado la partícula se destruye. Es decir, si el espín de una partícula se altera, la partícula en cuestión cambia de manera tan fundamental que ya no puede seguir siendo considerada un electrón, o un protón, o lo que quiera que fuese antes de sufrir esa alteración de su espín. Esto nos llega a preguntarnos si no es posible que todas las diferentes «partículas» sean simplemente distintos estados de movimiento de cualquier estructura o sustancia fundamental. Ésta es la pregunta básica en la física de las partículas.

Todo fenómeno en la mecánica cuántica tiene un aspecto cuántico que lo hace «discontinuo». Eso puede aplicarse al espín. Está cuantificado exactamente igual que la energía o la carga. Aparece en bloques y, como en la carga, todos son del mismo tamaño. En otras palabras cuando una peonza disminuye su velocidad de giro, su rotación no disminuye de manera suave y continua, sino en una serie de pequeños saltos. Estos saltos son tan pequeños y están tan juntos que es imposible observarlos. El trompo parece girar cada vez más lentamente hasta que se detiene por completo, pero realmente el proceso es a tirones, muy brusco.

Es como si el trompo sólo pudiera girar sometido a una extraña ley que nadie alcanza a comprender: sólo a 100 revoluciones por minuto, a 90 revoluciones por minuto, a 80 revoluciones por minuto y así sucesivamente, sin ningún valor intermedio posible. Si nuestra hipotética peonza tuviera que girar a menos 100 revoluciones por minuto, tendría que dar un salto hasta su próxima velocidad de giro, 90 revoluciones por minuto. Esto es análogo a la situación de las partículas subatómicas con la excepción de que (1) tipos particulares de partículas siempre giran a la misma velocidad y (2) el espín de partículas subnucleares se calcula en términos de momento angular.

El momento angular depende de la masa, tamaño y espín del objeto que gira. En general el momento angular es la intensidad de la rotación o, dicho de otro modo, el esfuerzo requerido para detener la rotación. Mientras mayor sea el momento angular de un objeto mayor será el esfuerzo requerido para detener su giro. Una peonza no tiene un gran momento angular porque es pequeña y tiene poca masa. Un carrusel, en comparación, tiene un momento angular enorme, no porque gire con mayor rapidez, sino porque es mucho mayor y tiene mucha más masa.

Ahora que hemos entendido lo que es el espín, olvide todo lo que hemos aprendido, menos las últimas líneas (momento angular). Toda partícula tiene un momento angular fijo, definido y conocido, pero *¡no hay nada que gire!* Si no lo entiendes, no te preocupes. Los físicos tampoco entienden estas palabras, se limitan a usarlas. (Si uno trata de *comprenderlas*, se convierten en un *koán*).

El momento angular de una partícula subnuclear es fijo, conocido y definido. «Pero — escribió Max Born — no debe imaginarse que dentro de la materia haya algo que en realidad esté girando.»[9]

Dicho de otra manera, el espín de una partícula subatómica representa «la idea de una rotación sin la existencia de algo que gire...»[10] Incluso Born tuvo que admitir que este concepto es «más bien abstruso».[11] Pese a ello, los físicos utilizan este concepto porque las partículas subatómicas se comportan como si tuvieran un momento angular y éste, así se ha determinado, es fijo y definido en cada caso. Debido a ello, el espín en realidad es una de las principales características de las partículas subatómicas.

El momento angular de una partícula subatómica está basado en la constante de nuestro viejo amigo Planck (pág. 66). Recuérdese que la constante de Planck, a la que los físicos llaman «el quanto de acción», fue el descubrimiento que puso en movimiento la mecánica cuántica. Planck descubrió que la energía era emitida y absorbida no de manera continua sino en pequeños paquetes a los que llamó quantos. Desde su descubrimiento inicial la constante de Planck, que representa la naturaleza cuantificada de la emisión y absorción de la energía, ha hecho su aparición una y otra vez como un elemento esencial en la comprensión de los fenómenos subatómicos.

Cinco años después del descubrimiento de Planck, Einstein utilizó su constante para explicar el efecto fotoeléctrico y, más tarde, volvió a utilizarla para determinar el calor específico de los sólidos, un terreno muy alejado del estudio original de Planck sobre las radiaciones de los cuerpos negros. Bohr descubrió que el momento angular de los electrones cuando orbitan sus núcleos atómicos es una función de la constante de Planck; de Broglie utilizó la constante de Planck para calcular la longitud de onda de las ondas de la materia, y esa constante es un elemento central en el principio de incertidumbre de Heisenberg.

Pese a lo importante que es la constante de Planck en el terreno de lo subatómico resulta de todo punto inobservable en toda la extensión del mundo. Esto es debido a que el tamaño de los paquetes con los cuales la energía es emitida y absorbida son tan pequeños que, para nosotros, la energía aparece como si fuera un flujo continuo. De manera semejante, debido a que la indivisible unidad del momento angular es tan pequeña, tampoco puede ser observada en el mundo de lo macroscópico. Un espectador en un partido de tenis, girándose en su asiento para seguir la trayectoria de la pelota tiene un momento angular que es 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 (un uno seguido de treinta y tres ceros) (10^{33}) mayor que el de un electrón. O dicho de otro modo, una pérdida de un céntimo en todo el producto bruto de los Estados Unidos causaría un trastorno *mil billones de veces* mayor que el cambio de una unidad del momento angular del espectador.[12]

En vez de escribir el real momento angular de una partícula subatómica, los físicos, por lo corriente, indican el espín de una partícula subatómica comparándola con el giro de un fotón, al que consideran como unidad y llaman uno. Este sistema descubre otra de las pautas inexplicables de los fenómenos subatómicos. Familias enteras de partículas tienen las mismas características de espín. La familia completa de los leptones,

las partículas ligeras tienen un espín de ½, lo que quiere decir que todas ellas tienen un momento angular que es ½ del momento angular de un protón. Lo mismo es cierto para toda la familia de los bariones, la familia de las partículas pesadas. Los mesones tienen también características de espín peculiares. «Giran» de tal modo que sus momentos angulares son siempre o bien 0, 1, 2, 3, etc., en relación con el momento angular de un protón, pero nada entre 0 (falta de espín) y 1 (el mismo espín del protón) ni entre 1 y 2 (doble del momento angular del protón), etc., etc.

Los valores de carga, espín y otras importantes características de la partícula están representadas por números específicos. Estos números se llaman números cuánticos. Cada partícula tiene una serie de números cuánticos que la identifica como un tipo particular de partícula. Cada partícula de un tipo particular tiene la misma serie de números cuánticos que cualquier otra partícula del mismo tipo. Cada electrón, por ejemplo, tiene los mismos números cuánticos que cualquier otro electrón. Los números cuánticos de un electrón, sin embargo, son distintos de los números cuánticos de un protón que, a su vez, son idénticos a los de cualquier otro protón. Las partículas individuales no tienen mucha personalidad. De hecho, no tienen personalidad en absoluto.

Cuando Dirac impuso las exigencias de la relatividad sobre la teoría del quanto, este formalismo indicó la existencia de una partícula de carga positiva muy particular. Dado que la única partícula con carga positiva conocida en esos días (1928) era el protón, Dirac y la mayor parte de los demás físicos supusieron que la teoría era responsable (matemáticamente) del protón. (Su teoría incluso fue criticada por ofrecernos la masa «errónea» de un protón).

Bajo una observación más detenida se hace evidente que la teoría de Dirac no describe al protón sino a una partícula totalmente distinta. La nueva partícula de Dirac era como un electrón con la diferencia que su carga y otras importantes propiedades eran las exactamente opuestas a las del electrón.

En 1932, Carl Anderson (que no había oído hablar de la teoría de Dirac) descubrió en el Cal Tech* esta nueva partícula y la llamó positrón. Más tarde, los físicos descubrieron que cada partícula tenía su opuesta, que era exactamente igual aunque opuesta en varios aspectos principales. Esta nueva clase de partículas fueron llamadas anti-partículas. Una anti-partícula, pese a su nombre, es una partícula. (La anti-partícula de una anti-partícula es otra partícula.)

Algunas partículas tienen otras partículas como anti-partículas (por ejemplo un mesón pi positivo es la anti-partícula de un mesón pi negativo, y viceversa). Unas pocas partículas son sus propias anti-partículas (como en el fotón).

* Cal Tech es el nombre que normalmente se da al Instituto Tecnológico de California. (*N. del T.*)

El encuentro de una partícula con su anti-partícula resulta espectacular. ¡Dondequiera que una partícula y su anti-partícula se encuentran, se eliminan una a otra! Cuando un electrón se encuentra con un positrón, por ejemplo, ambos desaparecen y en su lugar aparecen dos fotones que, inmediatamente, desaparecen de la escena a la velocidad de la luz. La partícula y la anti-partícula desaparecen, literalmente, en un ínfimo destello de luz. Y a la inversa, partículas y anti-partículas pueden ser creadas partiendo de la energía y siempre en pareja.

El universo está formado de ambas, de las partículas y de las anti-partículas. Nuestra parte de universo, sin embargo, está hecho casi enteramente de partículas regulares que se combinan para formar átomos regulares, que a su vez forman moléculas regulares que componen materia prima regular, que es de la que todos estamos hechos. Los físicos especulan con la idea de que en otras partes del universo las anti-partículas se combinan en anti-átomos, éstos en anti-moléculas que forman la anti-materia, que es la que determinaría a los anti-seres. No hay anti-seres (o anti-hombres) en nuestra parte del universo, porque si los hubiese haría ya mucho tiempo que habrían desaparecido en un relámpago de luz.

Leptones, mesones, bariones, masa, carga, espín y anti-partículas son varios de los conceptos que los físicos utilizan para clasificar los fenómenos subatómicos, cuando momentáneamente suponen que las partículas subatómicas son objetos reales que se mueven en el espacio. Estos conceptos son útiles, pero sólo en un contexto limitado. Este contexto se da cuando los físicos, por propia conveniencia, pretenden — como hacemos nosotros — que los danzarines pueden existir con independencia de la danza.

LA DANZA

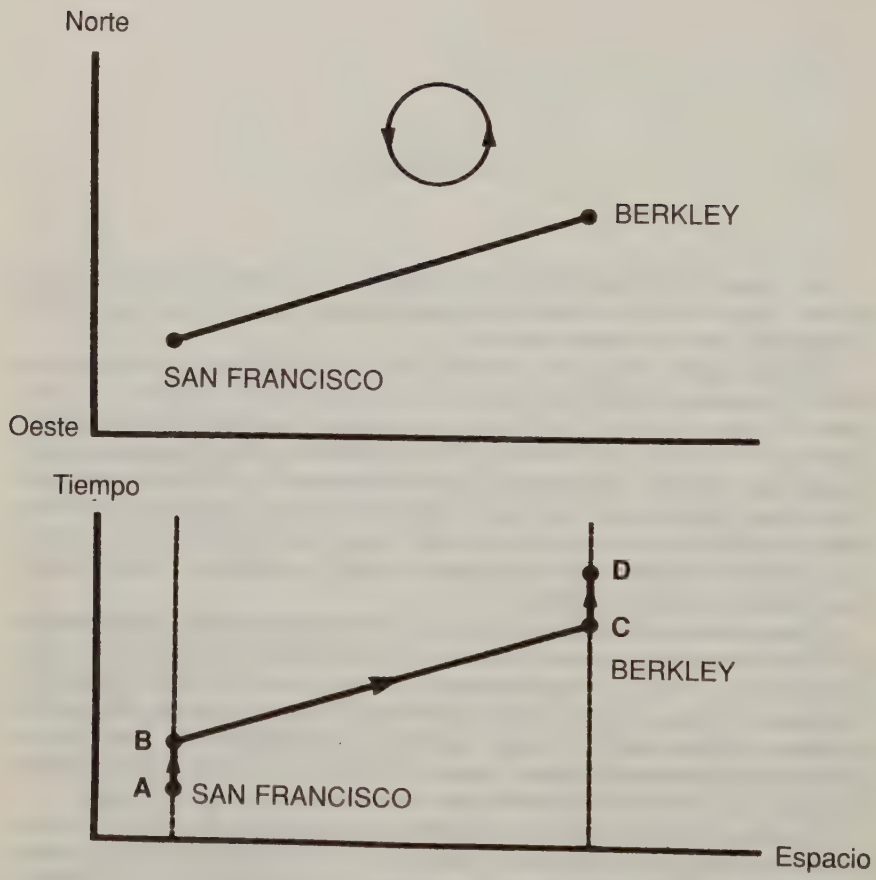
La danza de las partículas subatómicas nunca termina y nunca es la misma. Pese a ello, los físicos han encontrado un modo de expresar en diagramas las partes de mayor interés.

El más simple dibujo de cualquier tipo de movimiento es un mapa espacial. Un mapa espacial nos muestra la situación de los objetos en el espacio. El mapa de la página siguiente nos muestra la situación de San Francisco y de Berkeley, en California. El eje vertical es el eje norte-sur, como ocurre en cualquier otro mapa, y el eje horizontal es la línea este-oeste. Este mapa, además, nos muestra la trayectoria de un helicóptero que viaja entre San Francisco y Berkeley y, a una escala muy aumentada, nos muestra también la trayectoria de un protón dando vueltas en el ciclotrón del Laboratorio Lawrence Berkeley.

Como todos los mapas de carreteras, este mapa espacial es bidimensional. Nos muestra la distancia hacia el norte (la primera dimensión) y la distancia hacia el este (la segunda dimensión) que separa a Berkeley de San Francisco. No nos muestra la altitud del helicóptero (la tercera dimensión) y tampoco indica cuánto tiempo requiere el helicóptero para hacer el recorrido San Francisco-Berkeley (cuarta dimensión). Si quisiéramos mostrar el tiempo de ese vuelo tendríamos que trazar un mapa espacio-tiempo.

Un mapa espacio-tiempo nos muestra la posición de las cosas en el espacio y también su posición en el tiempo. El eje vertical en un mapa espacio-tiempo es el eje del tiempo. Los mapas espacio-tiempo son interpretados (leídos) de abajo arriba, porque el paso del tiempo está representado por el movimiento hacia arriba del eje del tiempo. El eje horizontal de un mapa espacio-tiempo es el eje espacial que nos muestra el movimiento de los objetos en el espacio. La trayectoria trazada por un objeto en un mapa espacio-tiempo se llama «línea universo». Por ejemplo, el mapa espacio-tiempo representado debajo nos muestra el mismo vuelo de San Francisco a Berkeley.

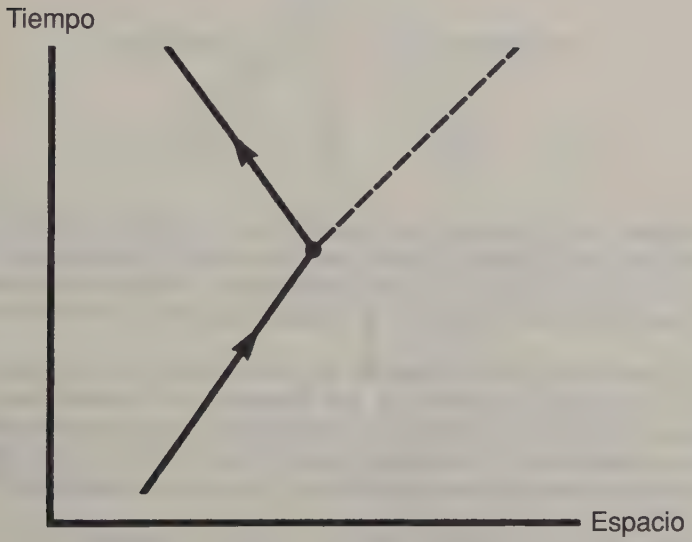
Inicialmente, el helicóptero está posado en San Francisco. Su «línea universo» es vertical porque en esos momentos no se está moviendo en el espacio pero sí en el tiempo. La línea A B es la «línea universo» mientras el helicóptero está parado en San Francisco. Cuando el helicóptero des-



pega para Berkeley se mueve hacia adelante tanto en el tiempo como en el espacio y su «línea universo» traza en el mapa espacio-tiempo la trayectoria que va de B a C. Cuando el helicóptero aterriza en Berkeley, su línea universo vuelve a ser vertical, porque de nuevo ha dejado de moverse en el espacio, pero, como todas las cosas, se sigue moviendo en el tiempo (línea C D). Las flechas indican la dirección en que se está moviendo el helicóptero. Se puede mover hacia adelante y hacia atrás en el espacio, pero, desde luego, sólo puede moverse hacia adelante en el tiempo. Las líneas de puntos muestran las líneas universo de San Francisco y Berkeley,

que, naturalmente, no se mueven en el espacio, excepto durante los terremotos de California.

Los físicos utilizan mapas espacio-tiempo semejantes para hacer los diagramas de la interacción de las partículas. Ofrecemos un diagrama espacio-tiempo de un electrón emitiendo un fotón.

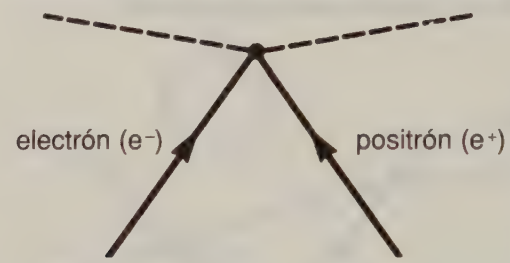


Comenzando en la parte baja un electrón se mueve por el espacio con una velocidad determinada. En un punto en el espacio (marcado por un grueso punto negro en el mapa) emite un fotón. El fotón se escapa a la velocidad de la luz hacia la derecha y el electrón, con su momento afectado por la emisión del fotón, altera su curso y se sigue moviendo, más despacio, hacia la izquierda.

En 1949, Richard Feynman descubrió que los mapas espacio-tiempo como éste tienen una exacta correspondencia con las expresiones matemáticas de las probabilidades que representan. El descubrimiento de Feynman fue una extensión de la teoría de Dirac en 1928 y ayudó a incorporar esa teoría en la teoría cuántica de campos que ya conocemos. Por esta razón a ese tipo de diagrama a veces se le llama diagrama de Feynman.*

* Los diagramas originales de este tipo son diagramas espacio-tiempo. Feynman descubrió, también, que las descripciones momento-energía espacio, que son complementarias a las descripciones espacio-tiempo, representan más detalladamente las condiciones actuales de un experimento de choque. El concepto básico de las descripciones espacio-tiempo y de las descripciones espaciales de momento-energía se ocupa de los momentos y las energías de las partículas involucradas,

Aquí ofrecemos un diagrama de Feynman de aniquilación de una partícula/anti-partícula.



Un electrón por la izquierda se aproxima a un anti-electrón (un positrón) que llega por la derecha. En el punto de colisión (indicado en el diagrama con un punto grueso) ambas partículas se aniquilan mutuamente creando dos fotones que parten en direcciones opuestas a la velocidad de la luz.

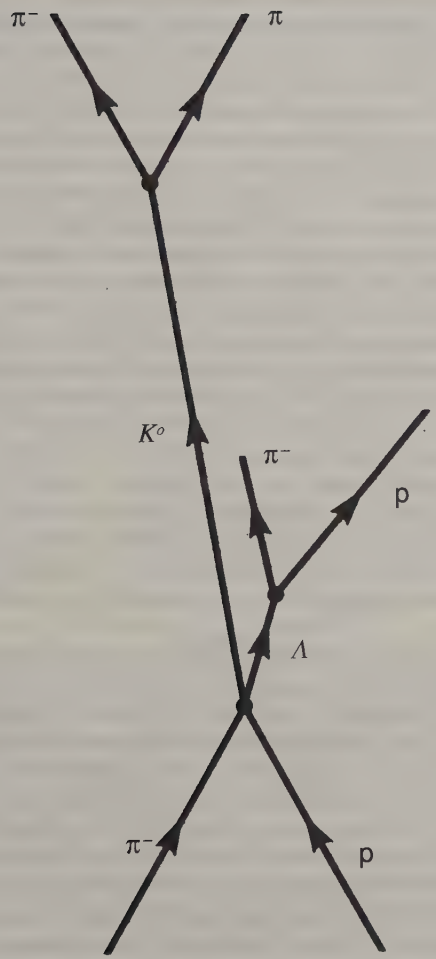
Un acontecimiento de este tipo en el mundo subatómico se llama un «suceso». Los sucesos se indican en los diagramas de Feynman por puntos gruesos. *Todo suceso subatómico está marcado por la aniquilación de las partículas iniciales y la creación de otras nuevas.* Esto es cierto para todos los sucesos y no sólo para aquellos en los que intervienen partículas y anti-partículas.

Con esto en mente, podemos mirar de nuevo el diagrama de la página anterior y verlo con una luz distinta. En vez de decir que un electrón que se mueve por el espacio emite un fotón que cambia el momento del electrón, podemos decir que un electrón que se mueve por el espacio emite un fotón y deja de existir en ese punto. En ese proceso se crea un nuevo electrón que desaparece de la escena con un nuevo momento. No hay forma de saber si esta interpretación es o no es correcta, debido a que todos los electrones son idénticos. Sin embargo, es más sencillo y más consistente suponer que la partícula original fue aniquilada y se crea una nueva partícula. La imposibilidad de distinguir entre sí las partículas subatómicas del mismo tipo hace que esto sea posible.

Aquí ofrecemos un diagrama de Feynman del proceso que discutimos en la página 198.

---

en vez de hacerlo con sus coordenadas espacio-tiempo. Los diagramas de ambas, pueden ser girados, como veremos. Hablando con propiedad, los restantes diagramas Feynman ofrecidos en este libro representan descripciones espaciales de momento-energía, salvo que estén especialmente identificados como diagramas espacio-tiempo.



Un mesón pi negativo colisiona con un protón y las dos partículas resultan aniquiladas. Sus respectivas energías de existencia (masas) y sus energías de movimiento crean dos nuevas partículas, una partícula lambda y un mesón K neutro. Estas dos partículas son inestables y viven menos de una billonésima de segundo antes de desintegrarse en otras partículas. El mesón K neutro se desintegra en un mesón pi positivo y un mesón pi negativo. La partícula lambda, y ésta es la parte más interesante, ¡se desintegra en las dos partículas originales (un mesón pi negativo y un protón)! Es como si hiciéramos chocar entre sí dos automóviles de juguete y en lugar de quedar reducidos a piezas rotas se convirtieran en otros automóviles

de juguete, algunos de ellos aún mayores que los originales.

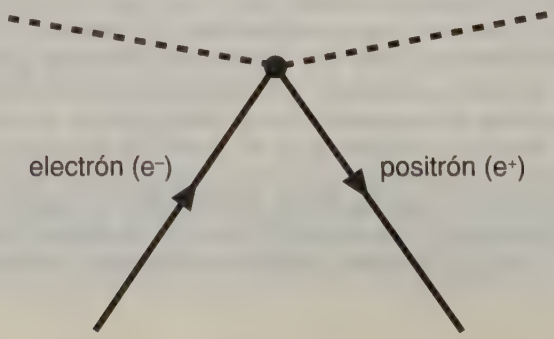
Las partículas subatómicas participan de manera permanente en esta incesante danza de creación y aniquilación. En realidad, las partículas subatómicas *son* esta incesante danza de creación y aniquilación. Este descubrimiento del siglo xx, con todas sus implicaciones sicodélicas, no es un concepto nuevo. De hecho es muy semejante a la forma como ven su realidad una gran parte de la población de la tierra, incluyendo a los hindúes.

La mitología hindú es, virtualmente, una proyección a gran escala en el terreno sicológico de los descubrimientos científicos microscópicos. Las deidades hindúes, como Shiva o Vishnú danzan de manera continua la creación y la destrucción del universo, mientras que la imagen budista de la rueda de la vida simboliza el proceso infinito del nacer, morir y renacer, que es parte del mundo de la forma, que es vacío, que es forma.

Imaginemos que un grupo de jóvenes pintores han creado una escuela de arte nueva y revolucionaria. Sus pinturas son tan singulares que tienen que comentarlas con el director de un viejo museo. El director mira las nuevas pinturas, agita la cabeza con sorpresa y se dirige a la cámara acorazada. Regresa algún tiempo después trayendo varios cuadros muy antiguos que coloca junto a las obras de los jóvenes artistas. El arte nuevo es tan semejante al arte antiguo que los jóvenes pintores quedan realmente sorprendidos. Los nuevos revolucionarios, en su propio tiempo y con sus propios medios, han redescubierto una antiquísima escuela de pintura.

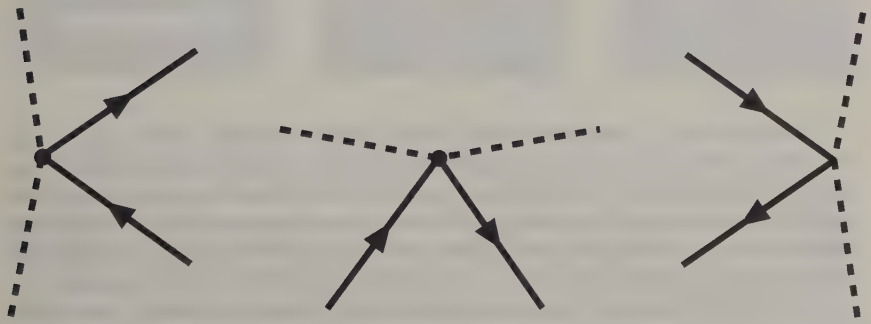
Volvamos de nuevo al diagrama de Feynman del aniquilamiento de un electrón y un positrón. Supongamos que usamos la punta de la flecha para indicar cuál es la partícula (el electrón) y cuál es la anti-partícula (el positrón) haciendo que las puntas de flechas hacia arriba indiquen las partículas y las flechas con la punta hacia abajo las anti-partículas. Esto hará que el diagrama de la página 216 sea igual que el de esta página.

Naturalmente el tiempo, como nosotros lo experimentamos, viaja sólo en una dirección, hacia adelante. (Esto es, hacia arriba en un diagrama espacio-tiempo). Pese a ello, nuestra sencilla convención puede ofrecernos un modo fácil de distinguir las partículas de las anti-partículas. Las líneas universo que parecen moverse hacia atrás en el tiempo, pertenecerían a las anti-partículas (los fotones no tendrían flechas porque ellos son sus propias anti-partículas).



En 1949, Feynman demostró que esa convención era algo más que un instrumento artístico. Descubrió que el campo de un positrón propagándose hacia adelante en el tiempo es matemáticamente igual al campo de un electrón que se propaga hacia atrás en el tiempo. En otras palabras, de acuerdo con la teoría cuántica de campo, *una anti-partícula es una partícula que se mueve hacia atrás en el tiempo.* Una anti-partícula no tiene por qué ser considerada, necesariamente, como una partícula que se mueve hacia atrás en el tiempo, pero ésta es la forma más sencilla y más simétrica de contemplar las anti-partículas.

Puesto que la dirección marcada por las cabezas de las flechas distingue a las partículas de las anti-partículas, podemos girar el diagrama original de Feynman y colocarlo en la posición deseada por nosotros y siempre seguiremos en condiciones de distinguir unas partículas de las otras. Aquí ofrecemos diversas formas de cómo podemos girar el diagrama original de Feynman.

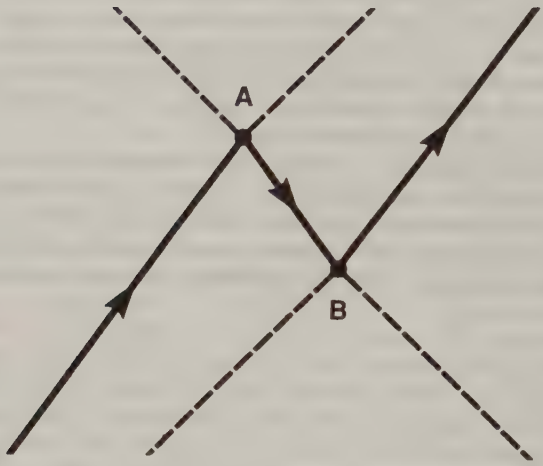


Cada una de estas variaciones es un diagrama distinto y representa la interacción partícula/anti-partícula.* Dando la vuelta completa al diagrama original podemos representar toda posible interacción entre un electrón y un positrón y dos fotones. La precisión, simplicidad y simetría de los diagramas de Feynman hace de ellos un tipo especial de poesía.

También presentamos un diagrama espacio-tiempo de *dos sucesos.* Una colisión entre dos fotones (en el punto B) crea un par electrón-positrón y, por consiguiente, un electrón y un positrón se aniquilan mutuamente y crean dos fotones (en A). (La mitad izquierda de este diagrama, la inter-

* Estas tres interacciones son: *izquierda*: un fotón y un electrón se aniquilan y crean un fotón y un electrón (dispersión electrón-fotón); en el *centro,* dos fotones se aniquilan para crear un positrón y un electrón (creación por pareja de un positrón-electrón), y *derecha,* un positrón y un fotón se aniquilan para crear un positrón y un fotón (dispersión positrón-fotón).

acción en A, es la misma que en la aniquilación electrón-positrón de la página 218.)



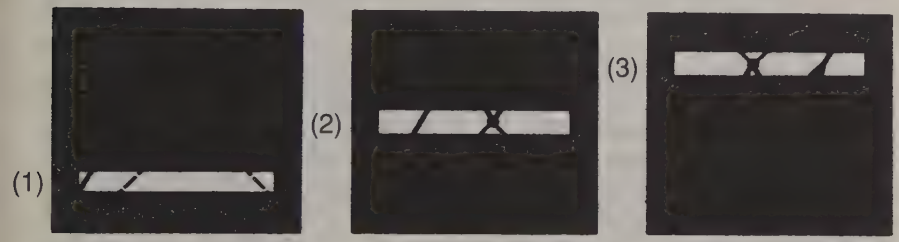
Normalmente, interpretaríamos estos acontecimientos como sigue: dos fotones chocan en la parte inferior derecha del diagrama produciendo un par electrón-positrón. El electrón escapa hacia la derecha, mientras que el positrón lo hace hacia la izquierda, donde se encuentra a otro electrón que ha entrado en el diagrama por la parte inferior, a la izquierda. Se aniquilan mutuamente y crean dos fotones que escapan en direcciones opuestas.

La interpretación de la teoría cuántica de campos, preferida, es mucho más sencilla. En ella sólo hay *una* partícula. Esa partícula, un electrón, entra en el diagrama de la parte inferior izquierda y se desplaza hacia adelante en el tiempo y en el espacio hasta que emite dos fotones en A. Esto causa su cambio de dirección en el tiempo. Viajando hacia atrás en el tiempo, como positrón, absorbe dos fotones en B y cambia de nuevo su dirección en el tiempo y de nuevo se convierte en un electrón. En vez de tres partículas aquí tenemos solamente una partícula que se mueve de izquierda a derecha y que se desplaza, primero, hacia adelante en el tiempo, después hacia atrás en el tiempo y, por fin, de nuevo hacia adelante en el tiempo.

Éste es el tipo estático de representación gráfica espacio-tiempo descrita en la teoría de la relatividad de Einstein (pág. 157). Si pudiéramos observar todo un período de tiempo como observamos una completa región del espacio, veríamos que los sucesos no se despliegan con el transcurrir del tiempo sino que se presentan a sí mismos de manera completa, como un dibujo ya terminado sobre el tejido del espacio-tiempo. En esa imagen, los movimientos hacia adelante y hacia atrás en el tiempo no son más signi-

ficativos que los movimientos hacia adelante y hacia atrás en el espacio.

La ilusión de que los sucesos evolucionan en el tiempo se debe a nuestro especial tipo de percepción que sólo nos permite ver, cada vez, estrechas franjas de la imagen total espacio-tiempo. Por ejemplo, supongamos que colocamos un trozo de cartón en el que hemos practicado una rendija sobre el diagrama de la página 220, de modo que todo lo que podemos ver de la interacción es aquello que es visible por la abertura cortada en el cartón. Si movemos el trozo de cartón lentamente, hacia arriba, comenzando por la parte más baja, nuestra visión restringida descubrirá una serie de sucesos cada uno de ellos sucediendo después del otro.



En el primero vemos tres partículas, dos fotones que entran en nuestro campo de visión por la derecha y un electrón que penetra por la izquierda (1). Después vemos como los fotones chocan para producir un par electrón-positrón, el electrón escapa hacia la derecha y el positrón hacia la izquierda (2). Finalmente vemos al positrón de nueva creación que choca con el electrón original para crear dos nuevos fotones (3). Sólo cuando quitamos el cartón de manera total (que fue una construcción artificial, desde luego) podremos ver la imagen completa.

De Broglie escribió:

> «En el espacio-tiempo para cada uno de nosotros cada cosa constituye el pasado, el presente y el futuro como en un bloque... Cada observador, a medida que pasa su tiempo, descubrirá (por decirlo así) nuevas franjas de espacio-tiempo que aparecerán ante él como aspectos sucesivos del mundo material, pese a que en realidad el conjunto de los sucesos que constituyen el espacio-tiempo existe antes que el conocimiento que tiene de ellos.»[1]

—Espera un minuto —dice Jim de Wit a un físico especialista en partículas que pasa junto a él—. Resulta fácil hablar de movimientos hacia adelante y hacia atrás en el tiempo, pero yo jamás he experimentado marchar hacia atrás en el tiempo. Si las partículas pueden viajar hacia atrás en el tiempo, ¿por qué no puedo hacerlo yo también?

La respuesta que los físicos dan al problema es realmente simple: Hay una tendencia creciente en todos los lugares próximos del universo, dice la explicación, hacia el desorden (esta tendencia se llama «entropía»), para extenderse a costa del orden (negentropía). Supongamos, por ejemplo, que depositamos una gota de tinta negra en un vaso de agua clara. Al comienzo su presencia está bastante ordenada, es decir, todas las moléculas de la tinta están localizadas en una pequeña zona y claramente separadas de las moléculas de agua clara.

Sin embargo, a medida que el tiempo pasa, el movimiento molecular natural hace que las moléculas de la tinta negra se vayan diluyendo y mezclándose con el agua clara hasta que se han distribuido por todo el vaso, dando como resultado un líquido turbio y homogéneo sin estructura ni orden, sólo con una oscura uniformidad (entropía máxima).

La experiencia nos enseña a asociar el crecimiento de la entropía con el movimiento hacia adelante del tiempo. Si vemos un filme de un vaso de agua turbia que se va haciendo cada vez más clara hasta que toda la sustancia extraña disuelta en el agua se concentre en una simple gota que flota sobre ella, sabremos de inmediato que la película está siendo pasada a la inversa, es decir, de atrás hacia adelante. Naturalmente, esto es teóricamente posible, pero es algo tan improbable que (probablemente) nunca ocurrirá. En resumen, el tiempo «discurre» en la dirección de las probabilidades mayores, que es la dirección de la entropía creciente.

La teoría del desorden creciente o «entropía creciente» se llama la segunda ley de la termodinámica. Se trata de una ley estadística, esto quiere decir que no será válida salvo que haya muchos entes en una situación dada para que pueda actuar. Hablando en términos generales, las partículas subatómicas individuales son concebidas como entes aislados y de una vida tan corta que la segunda ley de la termodinámica no tiene aplicación en ellas.* ** Es válida, sin embargo, con las moléculas que son relativamente muy complejas en comparación con las partículas atómicas; con las células vivas, que son aún mucho más complejas que las moléculas, y con las personas, que están hechas de billones de células. Solamente a nivel subatómico, o del quanto, pierde su significado el concepto de flujo directo que tenemos del tiempo.

Sin embargo, se especula y hay algo de evidencia positiva en ese sentido, con que la conciencia, a los niveles más fundamentales *es* un proceso quántico. Los ojos adaptados a la oscuridad, por ejemplo, pueden detectar a un fotón aislado. Si esto es así, resulta concebible que, extendiendo nuestra consciencia a funciones que normalmente están bajo sus parámetros (es decir, del modo como los yoguis controlan la temperatura de su cuerpo y el ritmo de su pulso) podamos tener consciencia (experiencia) de esos

* La teoría de Hagedorn sobre las colisiones de muy alta energía utiliza la segunda ley de la termodinámica.

** La reversibilidad del tiempo existe *en potencia,* es decir, mientras las partículas están representadas por funciones de onda que se propagan. La irreversibilidad del tiempo es un artilugio del proceso de medición.

procesos en sí. *Si* a nivel del quanto el flujo del tiempo no tiene significado, *si* la consciencia es fundamentalmente un proceso semejante y *si* podemos tener consciencia de ese proceso dentro de nosotros, entonces es concebible que podamos experimentar la intemporalidad.

Si podemos experimentar las funciones más fundamentales de nuestra sique y éstas son de naturaleza cuántica, en ese caso resulta posible que conceptos ordinarios de espacio y tiempo, no se apliquen a ellas en absoluto (como parecen no tener aplicación tampoco en los sueños). Una experiencia de ese tipo será muy difícil de explicar de manera racional («El Infinito en un grano de arena/ y la Eternidad en una hora»), pero será, desde luego, muy real. Por esa razón no deberían descartarse a la ligera los informes sobre distorsión de tiempo y «existencia fuera del tiempo» que nos ofrecen los gurús, en Oriente, y los que «viajan» bajo los efectos del LSD, en Occidente.

Las partículas subatómicas no se quedan inmóviles, inactivas, limitándose simplemente a un papel pasivo de partícula subatómica. Más bien podría decirse que son como colmenas repletas de actividad. Un electrón, por ejemplo, está constantemente emitiendo y absorbiendo fotones, aunque no puede decirse que estos fotones sean fotones «de cuerpo entero», sino que son fotones de una variedad que podríamos llamar «visto y no visto». Son semejantes en todo a los fotones auténticos, con la excepción de que no escapan por sí mismos al ser emitidos, sino que por el contrario son reabsorbidos por el electrón, casi inmediatamente después de haber sido emitidos. Por esta razón se les llama fotones «virtuales». (Virtual significa que son así en efecto o esencia, aunque no de hecho.) Son, repetimos, fotones virtuales y lo único que impide que sean fotones auténticos y reales es su abrupta y repentina reabsorción por el mismo electrón que los emite.*

En otras palabras: en principio tenemos un electrón y después tenemos un electrón y un fotón y, de nuevo, otra vez solamente un electrón. Esta situación es, desde luego, una violación de la ley de conservación de la masa-energía, que nos dice, en efecto, que no podemos obtener algo de nada. No obstante, de acuerdo con la teoría cuántica de campo aquí conseguimos algo por nada, aunque ese algo sea tan efímero que sólo dura una mil billonésima de segundo (10^{-15}).** *** Ésta es la razón por lo que esto

* Desde otro punto de vista los fotones virtuales se diferencian de los fotones reales en que su masa de rèposo no es cero; únicamente los fotones de masa de reposo cero pueden escapar. Hay dos formas de tomar en consideración a los fotones virtuales matemáticamente. En la primera (la anticuada teoría de la perturbación) la masa de una partícula virtual es la misma que la de una partícula real, pero no se conserva la energía. En la segunda (la teoría de la perturbación de Feynman) momento-energía es conservado exactamente, pero la partícula virtual no tiene masa.

** En un proceso atómico típico, los fotones virtuales de alta energía tienen un período de vida aún más corto.

*** La cuestión estriba en que el espacio vacío no es realmente «nada». El espacio vacío tiene infinita energía. Según Sarfatti un proceso virtual se pone en

puede suceder, de acuerdo con la teoría del principio de incertidumbre de Heisenberg.

Este principio de Heisenberg, como fue formulado originalmente, dice que mientras más ciertos estemos de la posición de una partícula, menos ciertos podemos estar de su momento, y lo mismo a la inversa. Podemos determinar su posición exactamente, pero en ese caso no podemos tener idea de su momento. Si elegimos medir su momento con exactitud, en ese caso no estaremos en condiciones de saber dónde está situada (pág. 121).

Aparte de esta recíproca incertidumbre entre posición y momento, hay otra incertidumbre recíproca de tiempo y energía. Mientras menos incertidumbre haya sobre el tiempo involucrado en un suceso subatómico, mayor incertidumbre existirá sobre la energía involucrada en el suceso, y lo mismo a la inversa. Una medición tan precisa como una mil billonésima de segundo, deja muy poca incertidumbre sobre el tiempo de la emisión y absorción de un fotón virtual. Por consiguiente, debe causar una gran incertidumbre específica sobre la cantidad de energía que interviene en el suceso. Debido a esta incertidumbre, los equilibrios mantenidos por la ley de conservación de la masa-energía no se alteran. Dicho de otro modo, el suceso ocurre de manera tan rápida y pasa tan rápidamente, que el electrón puede aceptarlo.

Es como si el agente de policía que hiciera cumplir la ley de conservación de la masa-energía, volviera la espalda a las violaciones de la ley si éstas ocurren con gran rapidez. Y mientras más flagrante es la violación más rápidamente debe ser realizada.

Si facilitamos la energía necesaria para que un fotón virtual se convierta en un fotón real sin violar la ley de conservación de la masa-energía, esto ocurre así exactamente. Ésta es la razón por la cual un electrón excitado emite un fotón auténtico. Un electrón excitado es un electrón que se encuentra a un nivel energético superior a su estado fundamental. El estado fundamental de energía de un electrón es su nivel menor de energía cuando se encuentra lo más cerca que puede estar del núcleo de un átomo. Los únicos fotones que los electrones emiten cuando están en su estado fundamental son fotones virtuales que vuelven a reabsorber de inmediato para así no violar la ley de conservación de la masa-energía.

Un electrón considera que el estado fundamental es su hogar y no le gusta salir de casa. De hecho en la única ocasión que abandona su estado fundamental es cuando literalmente es expulsado de él por una energía extra. En este caso la primera preocupación del electrón es regresar a su estado fundamental (suponiendo que, en efecto, no haya sido empujado tan lejos del núcleo que se convierta en un electrón libre). Dado que el estado fundamental es un estado de baja energía, el electrón tiene que perder su exceso de energía antes de poder regresar a ese estado. Por tanto, cuando

---

marcha por un salto superlumínico (superlumínico significa más rápido que la luz) de negentropía (información) que brevemente organiza una parte de su infinita energía de vacío para hacer la (o las) partícula(s) virtual(es).

un electrón se encuentra con un nivel de energía mayor que su estado fundamental, lanza en chorro su exceso de energía en forma de un fotón. Ese fotón así lanzado es uno de los fotones virtuales del electrón que, de repente, se encuentra con la suficiente energía para seguir escapando sin violar la ley de conservación de la masa-energía, y así lo hace. En otras palabras: uno de los fotones virtuales del electrón se siente «ascendido» a fotón auténtico. La cantidad de energía (la frecuencia) del fotón ascendido depende del exceso de energía que le sobre al electrón para lanzarla. (El descubrimiento de que esos electrones solamente emiten fotones de determinada energía y no otros es lo que hace de la teoría cuántica una teoría del *quanto*.) Los electrones siempre están rodeados de un enjambre de fotones virtuales.*

Si dos electrones se aproximan entre sí lo suficiente para que su nube de fotones virtuales se superpongan es posible que un fotón virtual emitido por un electrón sea absorbido por el otro electrón. A continuación ofrecemos un diagrama de Feynman de un fotón virtual que ha sido emitido por un electrón y es absorbido por otro electrón.

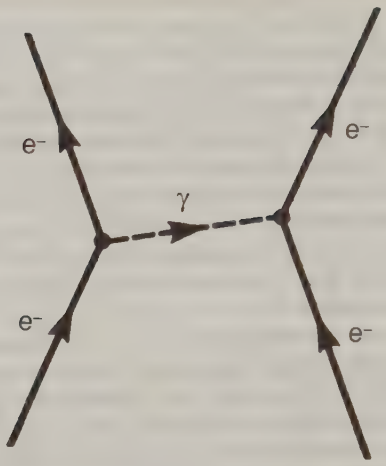
Mientras más próximos estén los electrones entre sí, con mayor facilidad ocurrirán estos fenómenos. Desde luego, el proceso es de ida y vuelta y ambos electrones absorben fotones virtuales emitidos por el otro.

De ese modo es como los electrones se repelen entre sí. Mientras más se aproximen dos electrones mayor será el número de fotones virtuales que intercambian y mientras más fotones virtuales intercambien más fuertemente se desviarán sus trayectorias. La «fuerza repulsiva» entre ellos es, sencillamente, el efecto acumulativo de estos intercambios de fotones virtuales, el número de los cuales aumenta cuando están muy cerca y disminuye cuando se distancian. De acuerdo con esta teoría, no existe la acción-a-distancia, sino simplemente un intercambio mayor o menor de fotones virtuales. Esta interacción (absorciones y emisiones) sucede en el mismo lugar, por decirlo así, es decir, exactamente donde se localizan las partículas que intervienen.**

La repulsión mutua de dos partículas de la misma carga, como por ejemplo dos electrones, es un ejemplo de fuerza electromagnética. De hecho, según la teoría cuántica de campos, una fuerza *es* el intercambio recíproco de electrones virtuales. (Los físicos gustan de decir que la fuerza electromagnética está «mediatizada» por los fotones). Cada partícula con carga eléctrica emite y reabsorbe fotones virtuales de manera continua y/o los intercambia con otras partículas con carga. Cuando dos electrones

* Hay otras partículas virtuales en la nube de partículas virtuales que rodean a un electrón, pero los fotones son los más comunes de entre ellos.

** Sin embargo, la esencia de la mecánica cuántica parece exigir una «acción-a-distancia» no-dinámica que opera con mayor rapidez que la luz. Un buen ejemplo de esto es el principio de exclusión de Pauli, que indica una correlación entre los movimientos de dos electrones para el intercambio de fotones virtuales de «señal». (Otros ejemplos — el teorema EPR y de Bell — serán expuestos en el último capítulo.)



(dos cargas negativas) intercambian fotones virtuales, se repelen entre sí. Lo mismo ocurre cuando dos protones (carga positiva) intercambian fotones virtuales. Cuando un protón y un electrón (una carga positiva y una carga negativa) intercambian fotones virtuales se atraen entre sí.

Por consiguiente, desde el desarrollo de la teoría cuántica de campos, los físicos, por lo general, han sustituido la palabra «interacción» por la palabra «fuerza». Una interacción ocurre cuando alguna cosa influye sobre alguna otra. En este contexto — un intercambio recíproco de fotones virtuales —, interacción es un término más preciso que el de fuerza, que etiqueta a lo que sucede entre electrones, pero no explica nada sobre ello. Esta parte de la teoría cuántica de campos (la parte original de Dirac) que trata con electrones, fotones y positrones, es llamada electrodinámica cuántica.

Los fotones virtuales, aun cuando se trata de partículas con carga, no serían visibles en una carga de burbujas debido a lo extremadamente corto de su vida. Su existencia se deduce matemáticamente. Por lo tanto esta extraordinaria teoría de que las partículas ejercen una fuerza recíproca mediante el intercambio de otras partículas es, claramente, una «creación libre» de la mente humana (pág. 29). No explica cómo «es realmente» la naturaleza es simplemente una construcción mental que predice con acierto lo que la naturaleza probablemente va a hacer a continuación. Podría haber, y probablemente las hay, otras construcciones mentales que puedan cumplir su cometido tan bien como ésta o mejor (aunque hasta ahora los físicos no han estado en condiciones de concebir ninguna otra). Lo más que podemos decir sobre esta teoría, como sobre cualquier otra, no es que sea «verdadera» o no, pero sí si es válida o no, si funciona de la manera que se supone debe actuar.

Se supone que la teoría cuántica puede predecir las probabilidades de que determinados fenómenos subatómicos ocurran bajo ciertas circunstancias. Aun cuando la teoría cuántica de campos en su totalidad no es del todo consistente, la realidad pragmática es que da resultado, *funciona*. Hay un diagrama de Feynman para cada interacción correspondiente a una fórmula matemática que, precisamente, predice la probabilidad de que suceda la interacción representada en el diagrama.*

En 1935, Hideki Yukawa, un estudiante graduado en física, decidió aplicar la nueva teoría de la partícula virtual a las «interacciones fuertes».

Las interacciones fuertes** mantienen unidos a los núcleos atómicos. Tiene que ser una fuerza intensa porque los protones, que conjuntamente con los neutrones forman el núcleo de un átomo, se repelen naturalmente entre sí. Al ser partículas del mismo signo (positivo) los protones tratan siempre de alejarse lo más posible entre ellos. Esto se debe a la fuerza electromagnética entre ellos. Pese a ello, en el interior del núcleo de un átomo esos protones, que mutuamente se repelen no sólo se mantienen en próxima vecindad, sino que además tienden a afianzarse entre ellos con firmeza. Lo que quiera que sea que mantiene sujetos a esos protones en un núcleo, razonaron los físicos, tiene que ser una fuerza muy grande en comparación con la fuerza electromagnética que actúa contra ello. Así, pues, decidieron llamar a esa gran fuerza, naturalmente, interacción fuerte.

El nombre está muy bien aplicado porque la interacción fuerte es cien veces más potente que la fuerza electromagnética. Es la mayor fuerza de todas las conocidas en la naturaleza. Al igual que la fuerza electromagnética es otra de las «colas» fundamentales que mantienen «pegada» la naturaleza. La fuerza electromagnética mantiene juntos a los átomos (para formar moléculas) e internamente (une a los electrones a sus órbitas en torno al núcleo). La interacción fuerte mantiene al núcleo unido en sí.

La interacción fuerte es, en cierto modo, de tipo muscular. Aunque es la mayor fuerza de todas las conocidas en la naturaleza, es la que tiene el menor campo de alcance de todas las demás fuerzas conocidas en la naturaleza. Por ejemplo, cuando un protón se aproxima al núcleo de un átomo comienza a experimentar la fuerza de repulsión electromagnética entre él mismo y los otros protones en el interior del núcleo. Mientras más cerca llegue el protón libre de los protones del núcleo, mayor será la fuerza de repulsión electromagnética entre ellos. (A un tercio de la distancia original, por ejemplo, la fuerza es nueve veces mayor.) Esta fuerza causa la desviación de la trayectoria del protón libre, una desviación suave si el protón está lejos del núcleo y muy pronunciada si el protón se acerca al núcleo.

Si empujamos al protón libre hasta aproximarlo a una distancia de una

* De hecho, hay una serie infinita de diagramas Feynman para cada interacción.

** «Great force» o gran fuerza en el original. (*N. del T.*)

diez billonésima (10^{-13}) de un centímetro del núcleo, repentinamente es sorbido en el núcleo con una fuerza que es cien veces más poderosa que la fuerza electromagnética de repulsión. Esa distancia, una diez billonésima de centímetro, es aproximadamente el tamaño del protón. En otras palabras, el protón, relativamente, no resulta afectado por la interacción fuerte incluso a una distancia ligeramente mayor que su propia magnitud. Pero si se acerca más, es totalmente dominado por la interacción fuerte.

Yukawa decidió explicar esta «gran fuerza», tan poderosa pero de tan corto campo de acción, en términos de partículas virtuales.

La teoría de Yukawa decía que la interacción fuerte estaba «mediatizada» por partículas virtuales, como la fuerza electromagnética está «mediatizada» por los fotones virtuales. Según la teoría de Yukawa, lo mismo que la fuerza electromagnética es un intercambio de fotones virtuales, la interacción fuerte *es* el intercambio de otro tipo de partícula virtual. Lo mismo que el electrón nunca se queda inactivo, sino que está emitiendo y reabsorbiendo fotones virtuales de manera constante, así los núcleos tampoco están inertes sino emitiendo y reabsorbiendo, de manera continuada, su propio tipo de partículas virtuales.

Un «nucleón» es un protón o un neutrón. Estas dos partículas son llamadas nucleones puesto que ambas se encuentran en el núcleo de los átomos. Son tan parecidas entre sí que, en términos generales, un protón puede ser considerado como un neutrón con carga positiva.

Yukawa conocía el alcance de esa «gran fuerza» por los resultados publicados de diversos experimentos. Suponiendo que el alcance limtado de la interacción fuerte fuera idéntico al alcance limitado de una partícula virtual emitida por un nucleón en el núcleo, calculó cuanto tiempo necesitaría esa supuesta partícula virtual, a velocidad próxima a la de la luz, para recorrer esa distancia y regresar al nucleón. Ese cálculo le permitió utilizar la relación de incertidumbre entre tiempo y energía para calcular la energía (masa) de esta hipotética partícula.

Doce años [y un caso de error de identidad] después, los físicos descubrieron la hipotética partícula de Yukawa.* La llamaron un mesón. *Una familia completa de mesones,* se descubrió posteriormente, eran las partículas que intercambiaban los nucleones para constituir la interacción fuerte. El primer mesón individual descubierto por los físicos fue llamado por éstos un «pion» (una abreviatura de «pi-mesón» en inglés y «mesón pi» en castellano). Los piones se presentaban en tres variedades: positivo, negativo y neutro.

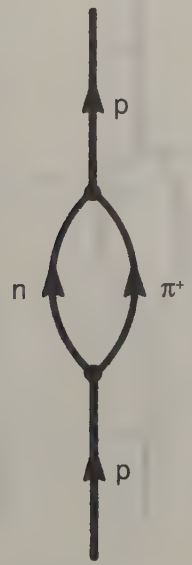
En otras palabras, un protón, como un electrón, es una colmena repleta de actividad. No sólo emite y reabsorbe fotones virtuales, lo que la hace susceptible a la fuerza electromagnética, sino que también emite y

* Cuando se descubrió el muon, en 1936, tenía todo el aspecto de la partícula anticipada por Yukawa. Sin embargo, resulta evidente que las propiedades del muon no eran las de la partícula de la teoría de Yukawa. Tuvieron que pasar once años más antes de que la teoría de Yukawa fuera confirmada.

absorbe piones virtuales, lo que la hace susceptible a la interacción fuerte. (Las partículas que no emiten mesones virtuales, como los electrones, por ejemplo, no son afectados en absoluto por la interacción fuerte.)

Cuando un electrón emite un fotón virtual que es absorbido por otra partícula, se dice que el electrón está interaccionado con la otra partícula. Sin embargo, cuando el electrón emite un fotón virtual y después lo reabsorbe, se dice que el electrón está interaccionando consigo mismo. La autointeracción hace del mundo de las partículas subatómicas una realidad caleidoscópica, cuyos auténticos constituyentes son, ellos mismos, incesantes procesos de transformación.

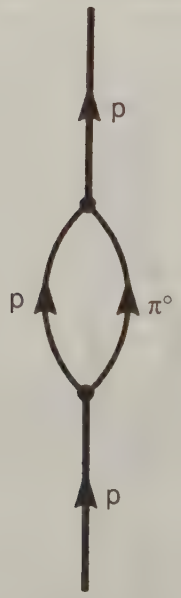
Los protones, como los electrones, pueden interaccionar consigo mismos en más de una manera. La más sencilla de las autointeracciones del protón es la emisión y reabsorción, dentro del tiempo permitido por el principio de la incertidumbre, de un pion virtual. Esta interacción es análoga a la de un electrón cuando está emitiendo y reabsorbiendo un fotón virtual. Primero tenemos la presencia del protón y, seguidamente, un protón y un pion neutro, después sólo queda el protón. A continuación representamos un diagrama de Feynman de un protón emitiendo y reabsorbiendo a un pion neutro.



Debido a que todos los protones son idénticos, podemos aceptar que el protón original dejó de existir de repente y, en el mismo punto en el espacio y en el tiempo, un nuevo protón y su pion adquieren existencia de

manera repentina. El nuevo protón y el pion neutral, constituyen una violación de la ley de conservación de la masa-energía, dado que su masa conjunta es mayor que la masa del protón original. Algo (el pion neutro) ha sido creado literalmente de la nada y rápidamente desaparece de nuevo (lo que hace de esto un proceso virtual). La duración de la vida de la nueva partícula está limitada al tiempo calculado por medio del principio de incertidumbre de Heisenberg. Las partículas se funden rápidamente, se aniquilan mutuamente y crean un nuevo protón. Un abrir y cerrar de ojos, figuradamente hablando, y todo ha pasado ya.

Hay otra forma mediante la cual un protón puede interaccionar consigo mismo. Además de emitir y reabsorber un pion neutro, un protón puede emitir un pion positivo. Sin embargo, al hacerlo así, el protón, momentáneamente, ¡se transforma a sí mismo en un neutrón! Primero tenemos un protón, después un *neutrón* (que ya de por sí tiene mayor masa que el original protón), más un pion positivo, seguidamente aparece de nuevo un protón. En otras palabras, una de las danzas que realiza un protón lo cambia de manera continua en un neutrón y de nuevo en un protón. A continuación ofrecemos el diagrama de Feynman de esta danza.



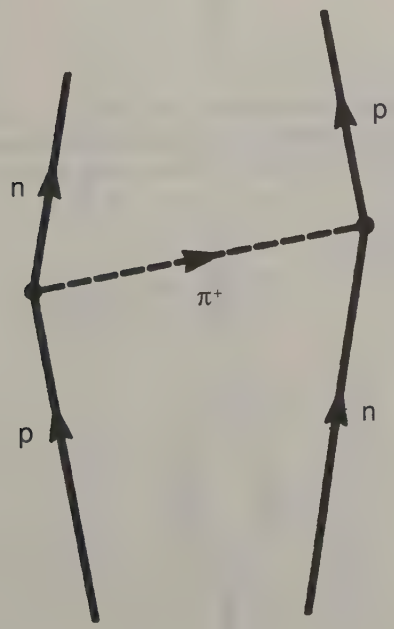
Cada nucleón está rodeado por una nube de piones virtuales, que el nucleón emite y reabsorbe constantemente. Si un protón se acerca lo suficiente a un neutrón, de manera que sus nubes de piones virtuales se superponen, algunos de los piones virtuales emitidos por el protón son absor-

bidos por el neutrón. A continuación ofrecemos un diagrama Feynman de un intercambio de pion virtual entre un protón y un neutrón.

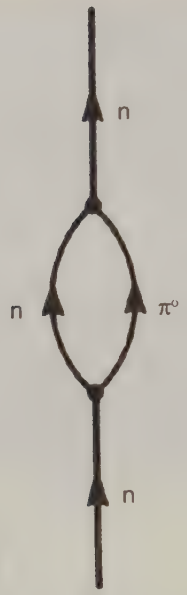
En la parte izquierda del diagrama, un protón emite un pion con carga positiva y, momentáneamente, se transforma en un neutrón. Antes de que el pion pueda ser reabsorbido, es capturado por el neutrón que se encuentra más próximo. La captura del pion hace que el neutrón se autotransforme en un protón. El intercambio del pion positivo hace que el protón se convierta en un neutrón y que el neutrón se convierta en protón. Los dos nucleones originales, unidos entre sí por este intercambio, cambian sus respectivos papeles.

Ésta es la base de la interacción de Yukawa. La interacción fuerte, según previó Yukawa en 1935, es un intercambio múltiple de piones virtuales entre nucleones. El número de intercambios (la intensidad de la fuerza) aumenta a distancias cortas y disminuye si éstas aumentan.

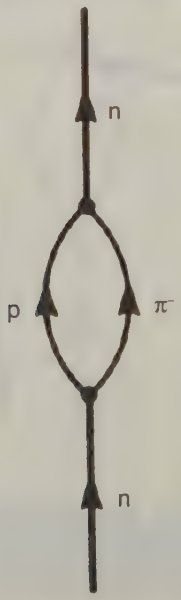
De manera similar, los neutrones nunca permanecen inactivos, satisfechos con ser lo que son. Como los protones y los electrones también interaccionan constantemente consigo mismos emitiendo y reabsorbiendo



partículas virtuales. Al igual que los protones y los neutrones, emiten y reabsorben piones neutros. A continuación ofrecemos un diagrama de Feynman de un neutrón emitiendo y reabsorbiendo un pion neutro (π^0).



Además de emitir un pion neutro, un neutrón también puede emitir un pion negativo. ¡Pero cuando un neutrón emite un pion negativo se transforma en un protón! Primero tenemos un neutrón, después hay un

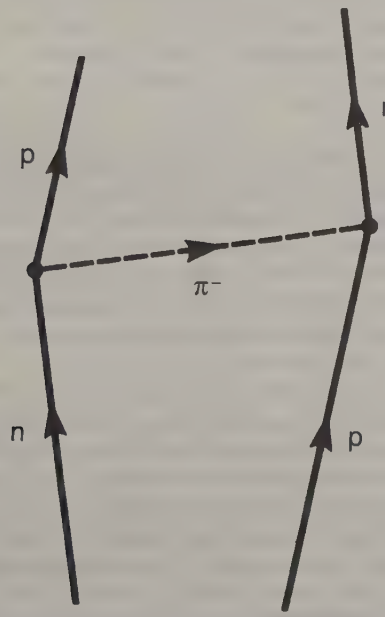


protón más un pion negativo, seguidamente de nuevo un neutrón. A continuación ofrecemos un diagrama de Feynman de esta danza que de continuo transforma a un neutrón en un protón y de nuevo en un neutrón.

Si un neutrón se acerca demasiado a un protón entonces sus respectivas nubes de piones virtuales se superponen y algunos de los piones emitidos por el neutrón son absorbidos por el protón. Ofrecemos a continuación un diagrama de Feynman de un intercambio de piones virtuales entre un neutrón y un protón.

Ésta es otra interacción fuerte. En la mitad izquierda del diagrama un neutrón emite un pion negativo y, momentáneamente, se transforma en un protón. Sin embargo, antes de que el pion negativo pueda ser reabsorbido, es capturado por un protón próximo que, a su vez, se convierte en un neutrón. Como antes, este par de nucleones enlazados entre sí por un intercambio de pion virtual, cambian sus papeles.

Hay muchas más interacciones fuertes. Aunque los piones son las partículas intercambiadas con mayor frecuencia en la creación de la interacción fuerte, los otros mesones (como kaones, partículas eta, etc.) son asi-



mismo intercambiados. No hay interacción fuerte; sólo un número variable de intercambios de partículas virtuales entre nucleones.

De acuerdo con los físicos, el universo se mantiene unido por cuatro tipos fundamentales de «colas» o pegamentos. Además de la fuerza electromagnética y la interacción fuerte tenemos la interacción débil y la fuerza de la gravitación.*

La gravedad es la fuerza de mayor alcance y mantiene unidos sistemas solares, galaxias y universos. Sin embargo, a nivel subatómico su efecto es tan despreciable que se ignora por completo. Hay que confiar en que las futuras teorías así lo tengan en cuenta.

La fuerza débil es la menos conocida de las cuatro fuerzas. Su existencia se infiere del tiempo requerido para ciertas interacciones subatómicas. La interacción fuerte es de tan corto alcance y de tanta potencia que sus interacciones ocurren muy rápidamente, en 0,000000000000000000000001 segundo (10^{-23}). Sin embargo, los físicos descubrieron que algunos otros tipos de interacción de partículas por ellos conocidos y que no estaban relacionados con la fuerza electromagnética ni con la fuerza de gravitación, requerían un tiempo mucho más largo, unos 0,0000000001 (10^{-10}). Por consiguiente, dedujeron de este extraño fenómeno que debía existir un cuarto tipo de fuerza. Dado que esa cuarta fuerza, como se sabía, era más débil que la fuerza electromagnética se la llamó fuerza débil.

En orden a su potencia las cuatro fuerzas son:
La interacción fuerte (nuclear).
La fuerza electromagnética.
La interacción débil.
La gravedad.

Dado que la interacción fuerte y la fuerza electromagnética pueden ser explicadas en términos de partículas virtuales, los físicos aceptan que lo mismo es cierto para las otras dos fuerzas. La partícula asociada con la gravedad es el gravitón, cuyas propiedades han sido explicadas teóricamente, pero cuya existencia no ha sido confirmada. La partícula asociada con la fuerza débil es la partícula «W», sobre la cual se ha teorizado mucho, pero de la que no se ha descubierto gran cosa.

El alcance de la interacción fuerte, en relación con la fuerza electromagnética es limitado debido a que los mesones tienen una gran masa, comparativamente con los fotones. Recordemos que el policía que obliga al cumplimiento de la ley de conservación de la masa-energía está dispuesto a hacer la vista gorda ante la violación de esa ley si ésta se verifica con la suficiente rapidez, de manera que mientras más flagrante es la violación más rápidamente debe suceder. La creación momentánea de un mesón partiendo de la nada es una violación mucho más flagrante de la ley de conservación de la masa-energía que la momentánea creación de un fo-

* Pruebas recientes dan cada vez mayor crédito a la teoría de Weinberg-Salam de que la interacción débil y la electromagnética son, realmente, distintas manifestaciones de la misma fuerza, que opera a diferentes distancias entre partículas.

tón partiendo de la nada. De esta forma, la creación y reabsorción de un mesón tiene que suceder con mayor rapidez para que se mantenga bajo la protección, por decirlo así, de la relación de incertidumbre entre tiempo y energía. Debido a que el tiempo de vida de un mesón virtual es limitado, su alcance también lo es. La regla que gobierna este fenómeno dice así: Cuando más intensa es la fuerza, más másica es la partícula mediadora y más corto su alcance. De acuerdo con ello, el alcance de la fuerza electromagnética es *infinito*. ¡Esto se debe a que los fotones *no tienen masa de reposo en absoluto*!

—Espera un momento — dice Jim de Wit, que por una vez está de acuerdo con nosotros —. Eso no tiene sentido. Un fotón virtual es un fotón que es emitido y reabsorbido con la necesaria rapidez para evitar la violación de la ley de conservación de masa-energía. ¿De acuerdo?

—Así es — le responde un físico, especialista en el estudio de las partículas, que pasa por allí de camino hacia su ciclotrón.

—En ese caso, ¿cómo es posible que una partícula, o cualquier otra cosa, pueda ser emitida y reabsorbida, dentro de ciertos límites, como los límites impuestos por el principio de incertidumbre y, al mismo tiempo, tener un radio de acción infinito? ¡Eso no tiene sentido!

De Wit tiene razón para hablar así. A primera vista, parece que su observación es correcta. Bajo una observación más detallada, sin embargo, *hay* una lógica sutil involucrada en el asunto que *tiene* sentido. Si las limitaciones de la ley de conservación de la masa-energía son esquivadas por un equilibrio de tiempo y energía (masa) permitido por el principio de incertidumbre y un fotón virtual *no* tiene masa (en reposo), en ese caso dispone de todo el tiempo del mundo, literalmente, para ir donde se le antoje. En otras palabras, no hay diferencia práctica entre un fotón «real» y un fotón «virtual». La única diferencia entre ellos es que la creación de un fotón «real» no viola la ley de conservación de la masa-energía y la creación de un fotón «virtual» esquiva esa ley de manera momentánea por la vía del principio de incertidumbre de Heisenberg.

Éste es un buen ejemplo de lo irreal y quimérico que puede sonar la explicación no-matemática de una teoría física de éxito reconocido. La razón de esto es que las teorías físicas, para describir de manera más adecuada y aproximada los fenómenos sometidos a consideración, se van divorciando más y más de la experiencia cotidiana (es decir, se van haciendo más abstractas). Aun cuando esas teorías altamente abstractas como la teoría del quanto y la relatividad, son acertadas hasta un grado que causa pavor, lo cierto es que, en verdad, son «creaciones libres» de la mente humana. Su lazo primario con la experiencia ordinaria no es el contenido abstracto de sus formalismos, sino el hecho de que, como sea, actúan y son válidas.*

Lo que distingue a un estado transitorio, virtual (nada-algo-nada) de

* Paul Schilpp (editor), *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, vol. I, Nueva York, Harper and Row, contiene ciertos ensayos sobre el tema.

un estado «real» (algo-algo-algo) es semejante a la distinción budista entre realidad, como es realmente, y la forma como corrientemente la vemos. El mismo Feynman, por ejemplo, describe la diferencia entre el estado virtual y el estado real (de un fotón), como cuestión de perspectiva.

> «... lo que aparece como un proceso real desde un punto de vista, puede aparecer como un proceso virtual que ocurre sobre una mayor extensión de tiempo. Por ejemplo, si deseamos estudiar un determinado proceso real, como la difusión de la luz, podemos, si lo deseamos así, incluir en nuestro análisis la fuente, el difusor y el absorbedor posibles de la luz difusa. Podemos imaginar que al principio no existía fotón alguno y que en el momento de iniciar el experimento la fuente emite luz... La luz es difundida y, en ciertos casos, absorbida... Desde ese punto de vista el proceso es virtual, es decir, empezamos sin ningún fotón y terminamos sin ellos. De ese modo podemos analizar el proceso por medio de nuestras fórmulas para los procesos reales, intentando romper el análisis en las partes correspondientes a la emisión, la difusión y la absorción.»[2]

De acuerdo con la teoría budista, la realidad es «virtual» por naturaleza. Lo que aparece como objetos «reales» en ella, como árboles o gentes, realmente son ilusiones transitorias, resultado de una forma limitada de consciencia. La ilusión está en que algunas partes de un proceso, en todo virtual, son «cosas reales» (permanentes). «Iluminación» es sentir que las cosas — incluso el «Yo» — son transitorias, estados virtuales privados de una existencia separada, lazos momentáneos entre ilusiones del pasado e ilusiones del futuro que se despliegan en la ilusión del proceso del tiempo.

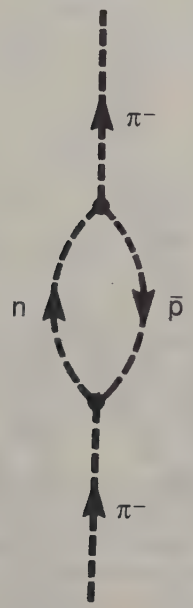
Las interacciones entre partículas se hacen bastante complicadas, cuando las partículas virtuales emiten partículas virtuales que, a su vez, emiten partículas virtuales en una secuencia decreciente. A continuación ofrecemos un diagrama de Feynman de una partícula virtual (un pion negativo) transformándose momentáneamente en otras dos partículas virtuales más, un neutrón y un anti-protón. (En 1928 la teoría de Dirac, también predijo la existencia del anti-protón que fue descubierto en Berkeley en el año 1955.)

Éste es el ejemplo más simple de auto-interacción descendente. En la página 238 está el diagrama de la exquisita danza de un simple protón, llevada a cabo en ese espacio de tiempo diminuto permitido por el principio de incertidumbre. Este diagrama fue diseñado por Kenneth Ford en su libro *The World of Elementary Particles.**[3] Once partículas hacen su aparición transitoria entre el tiempo en que el protón original se trans-

* El Mundo de las Partículas Elementales.

forma a sí mismo en un neutrón y un pion y el tiempo en que de nuevo se convierte en un solo protón.

Un protón se conforma con ser un simple protón. Alterna entre ser un protón y un pion neutro y por la otra ser un neutrón y un pion positivo. Un neutrón nunca continúa siendo un sencillo neutrón, por una parte, y un protón y un pion negativo por la otra. Un pion negativo nunca se conforma con ser solamente un simple pion negativo. Alterna entre ser un neutrón y un antiprotón por una parte, y por la otra, etc., etc. En otras



palabras, *todas las partículas existen potencialmente (con cierta probabilidad) como diferentes combinaciones de otras partículas.* Cada combinación tiene cierta probabilidad de suceder.

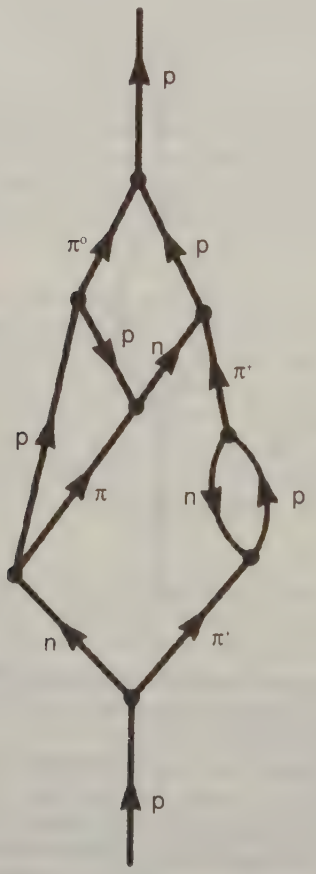
La teoría cuántica trata de la probabilidad. La probabilidad de cada una de esas combinaciones puede ser calculada con certeza. De acuerdo con la teoría cuántica, no obstante, es la suerte la que decisivamente determina cuál de esas combinaciones ocurrirá realmente.

El punto de vista cuántico según el cual todas las partículas existen potencialmente como diferentes combinaciones de las otras partículas, tiene un gran paralelismo con un punto de vista budista, una vez más. De acuerdo con el *Flower Garlan Sutra,* cada parte de la realidad física está construida de todas las demás partes. (Un *sutra* es un relato escrito de la doctrina de Buda.) Este tema está ilustrado en el *Flower Garland Sutra*

con la metáfora de la red de Indra. Consiste ésta en una vasta red de perlas que cuelga cubriendo el palacio de oro de Indra.

En palabras de una traducción castellana:

> «Se dice que en el cielo de Indra hay una red de perlas, colocada de tal modo que si uno mira a una ve a todas las demás reflejadas en ella. Del mismo modo, cada objeto en el mundo no es simplemente él mismo, sino que incluye todos los demás objetos y, de hecho, *es* todo lo demás.»[4]

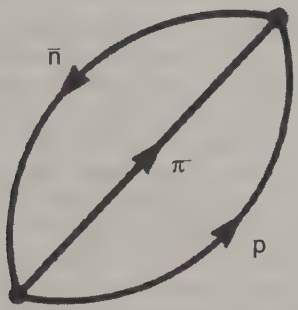


La apariencia de la realidad física, de acuerdo con el budismo mahayana, se basa en la interdependencia de todas las cosas.* **

* Tras un cambio de impresiones con el profesor John Blofeld, un estudioso del budismo y el taoísmo, creo que incluso existen mejores ilustraciones de este

Aunque este libro no trata de física y budismo de manera específica, las semejanzas entre las dos, especialmente en el campo de la física de las partículas, son tan sorprendentes y plenas que un estudiante de una de estas disciplinas necesariamente encontrará valiosas las enseñanzas de la otra.

Hemos llegado en este momento al aspecto más sicodélico de la física de las partículas. A continuación ofrecemos un diagrama de Feynman de una interacción de tres partículas.



En ese diagrama ninguna línea universo asciende hasta la interacción ni ninguna se separa de ella. El acontecimiento simplemente sucede. Literalmente, sucede procedente de ninguna parte, sin razón aparente y sin causa aparente. Donde no había *nada,* de repente, en un relámpago de existencia espontánea hay tres partículas que desaparecen después sin dejar rastro.

Este tipo de diagrama de Feynman es llamado un «diagrama de vacío».* Esto es porque la interacción sucede en un vacío. Un «vacío», como normalmente lo representamos, es un espacio enteramente vacío. Los diagramas de vacío, sin embargo, demuestran gráficamente que no existe tal cosa. Del «espacio vacío» llega algo y, después, ese algo desaparece de nuevo en el «espacio vacío».

En el terreno de lo subatómico, un vacío obviamente *no* está vacío.

---

concepto en *The Flower Garland Sutra* que la metáfora de la red de Indra. (*The Flower Garland Sutra* que también es llamado el *Hua Yen Sutra* [en chino] y el *Avatamsaka Sutra* [sánscrito] es extremadamente largo.) Una traducción completa, comentada, requeriría 150 volúmenes. En el momento de imprimir este libro no hay una traducción completa al inglés de *The Flower Garland Sutra,* aunque se está llevando a cabo una por la Buddhist Text Translation Society, Ciudad de los Diez Mil Budas, Talmage, California 95481.

** La teoría del bootstrap, de G. F. Chew, puede ser una analogía física de la teoría budista de las generaciones interdependientes.

* Brian Josephson, Jack Sarfatti y Nick Herbert, independientemente, especularon con la idea de que el equipo sensorial humano podría detectar las fluctuaciones del punto cero de vacío de la danza de las partículas virtuales en el espacio vacío, predicha por el principio de incertidumbre. Si eso es así, tales percepciones podrían formar parte del mecanismo del conocimiento místico.

Entonces, ¿de dónde procede la noción de un «espacio» completamente vacío, árido y estéril? ¡Es un producto nuestro! En el mundo real no existe algo así como «espacio vacío». Es una construcción metal, una idealización que hemos acabado por aceptar como si fuera una cosa cierta.

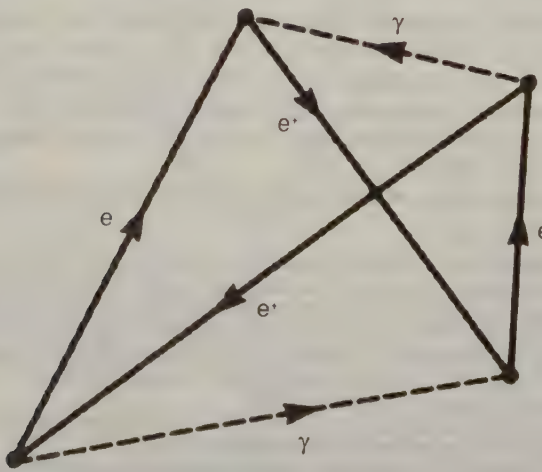
Vacío y lleno son «distinciones falsas» que *nosotros hemos creado,* como la distinción entre *algo* y *nada.* Son abstracciones de la experiencia que hemos confundido con la propia experiencia. Tal vez hemos vivido tanto tiempo en nuestras abstracciones que en vez de percibir que las hemos extraído del mundo real acabamos creyendo que *son* el mundo real.

Los diagramas de vacío son el producto serio de una ciencia física bien intencionada. Sin embargo, son también maravillosos recordatorios de cómo podemos, intelectualmente, crear nuestra «realidad». No es posible, de acuerdo con nuestros conceptos usuales de «algo», que este algo brote del «espacio vacío», pero a nivel subatómico así sucede, y esto es lo que ilustran los diagramas de vacío. En otras palabras, no existe el «espacio vacío» (o la nada), excepto como un concepto en nuestra mente clasificadora.

Los *sutras* esenciales del Budismo Mahayana (el tipo de budismo que se practica en Tibet, China y Japón) son llamados los *Praynaparamita Sutras** (hay doce volúmenes de ellos). El que ocupa el lugar esencial se llama simplemente *El Sutra del Corazón* y contiene una de las importantes ideas del Budismo Mahayana:

«... la forma es vacío, el vacío es forma.»

A continuación ofrecemos un diagrama de vacío de seis diferentes partículas que interaccionan mutuamente.



* Prayna (sánscrito) significa «sabiduría», «conocimiento», pero se trata de un especial tipo de sabiduría que no puede conseguirse estudiándola en los libros. *Paramita* (literalmente «cruzar sobre») significa «llevar algo a la perfección».

Representa una exquisita danza de vacío transformándose en forma y la forma transformándose en vacío. Tal vez, como han escrito los sabios de Oriente, la forma *es* vacío y el vacío *es* forma.

En todo caso, los diagramas de vacío son representaciones de notables transformaciones de «algo» en «nada» y de «nada» en «algo». Estas transformaciones ocurren de manera continua en el terreno de lo subatómico y están limitadas únicamente por el principio de incertidumbre, las leyes de conservación y las de probabilidad.*

Hay unas doce leyes de conservación. Algunas de ellas afectan a todo tipo de interacciones subatómicas. Hay una regla simple que vale la pena recordar: La interacción fuerte, es aquella cuyas interacciones están más restringidas por las leyes de conservación. Por ejemplo, las grandes interacciones fuertes están limitadas por las doce leyes de conservación; las interacciones electromagnéticas están restringidas por once de las leyes de conservación; y las interacciones débiles sólo están restringidas por ocho de las leyes de conservación.** Las interacciones gravitatorias, esas que involucran a la fuerza más débil en el mundo de lo subatómico, no han sido estudiadas todavía (nadie ha encontrado un gravitón), pero es posible que éstos puedan violar, incluso, un número mayor de leyes de conservación.

Pese a ello, allí donde las leyes de conservación tienen jurisdicción, son reglas inviolables que dan forma a todas las interacciones de partículas. Por ejemplo, la ley de conservación de la masa-energía establece que todas las partículas espontáneas se desintegran siempre en partículas más ligeras. La masa total de las nuevas partículas es siempre menor que la masa de la partícula original. La diferencia entre la masa de la partícula original y la suma de las masas de las nuevas partículas, se convierte en energía cinética de las nuevas partículas (que escapan).

Las interacciones «ascendentes» son posibles únicamente cuando la energía cinética, sumada a la energía de existencia (masa) de las partículas originales está disponible para la creación de nuevas partículas. Dos protones que colisionan, por ejemplo, pueden crear un protón, un neutrón y un pion positivo. La masa total de esas nuevas partículas es mayor que la

* Las leyes de conservación imponen pruebas absolutas, pero las leyes de probabilidad pueden, efectivamente, excluir mucho de lo que las leyes de conservación podrían permitir. Éstas imponen una gran cantidad de estructuras.

** Las interacciones fuertes están restringidas por las doce leyes de la conservación: energía, momento, momento angular, carga, número familiar del electrón, número familiar del muon, número familiar del barión, inversión del tiempo (T), inversión espacial combinada con la conjugación de carga (PC), inversión espacial sola (P) y conjugación de carga sola (C), extrañeza, y espín isotópico.

Las interacciones electromagnéticas, en un escalón por debajo de la potencia, pierden la ley de conservación del espín isotópico. Las interacciones débiles, otro escalón por debajo, pierden la conservación de la extrañeza, la conservación de la paridad, y la invariabilidad de la conjugación de carga, pero permanece la combinación (PC). Las interacciones de la gravitación, en el peldaño más bajo de la escala no han sido expresadas.

masa de los protones originales. Esto es posible porque parte de la energía cinética del protón proyectil interviene en la creación de las nuevas partículas.

Además de la masa-energía, el momento se conserva en cada interacción de partículas. El momento total de las partículas que van a participar en la interacción tiene que ser igual al momento total de las partículas que dejan la interacción. Ésta es la razón por la cual la desintegración espontánea de una sola partícula produce siempre otras dos partículas como mínimo. Una partícula en reposo tiene un momento cero. Si se desintegrara en una sola partícula nueva que luego desapareciera, el momento de la nueva partícula excedería el momento de la partícula original (que es cero). Sin embargo, los *momentos* de (como mínimo) dos nuevas partículas que vuelan en direcciones opuestas se cancelarán entre sí, produciendo un momento total igual a cero.

La carga se conserva en toda interacción de partículas. Si la carga total de las partículas que intervienen en la interacción es más dos (por ejemplo, dos protones), la carga total de las partículas que abandonan la interacción tiene que ser igual a más dos (después de que las partículas positivas y negativas se anulan unas a otras). El espín se conserva también, aunque conservar este equilibrio resulta más complicado que el de la carga.

Además de las leyes de conservación de la masa-energía, momento, carga y espín, están las leyes de conservación de los números de familia. Por ejemplo, si dos bariones o partículas pesadas (como dos protones) entran en la interacción, entre las nuevas partículas resultantes tiene que haber dos bariones, como por ejemplo un neutrón y una partícula lambda.

Esta misma ley de conservación de los bariones, conjuntamente con la ley de conservación de la masa-energía, «explica» por qué los protones son partículas estables (es decir, que no se desintegran espontáneamente). La desintegración espontánea tiene que ser *descendente,* para satisfacer a la ley de conservación de la masa-energía. Los protones no pueden desintegrarse de manera descendente sin violar la ley de conservación de los números de familia del barión, porque los protones son los bariones más ligeros. Si un protón se desintegrara espontáneamente, tendría que hacerlo en partículas más ligeras que él mismo, pero no hay partículas barión más ligeras que el protón. En otras palabras, si un protón se desintegrara habría un barión menos en el mundo. De hecho esto no ocurre nunca. Este esquema (la ley de conservación de los números de familia del barión) es el único modo hallado hasta ahora por los físicos para explicar la estabilidad del protón. Una ley semejante, de conservación de los números de familia de los leptones, mantiene la estabilidad de los electrones. No hay una partícula leptón más ligera que un electrón.

Algunas de las doce leyes de conservación son, realmente, «principios de invariancia». Un principio de invariancia es una ley que dice: «Sometidas a un cambio de circunstancias, como por ejemplo el cambio de localización del experimento, todas las leyes de la física siguen siendo válidas». Ese «todas las leyes de la física», por decirlo así, es la «cantidad conser-

vada» del principio de invariancia. Por ejemplo, se da el principio de invariancia de la inversión del tiempo. De acuerdo con este principio, para que un proceso pueda desarrollarse tiene que ser reversible en el tiempo. Si un positrón y un electrón se aniquilan crean dos fotones, lo cual es factible; la aniquilación de los dos fotones creará un positrón y un electrón.

Las leyes de conservación y los principios de invariancia están basados en lo que los científicos llaman simetrías. El hecho de que el espacio es igual en todas direcciones (es isotrópico) y en todos los lugares (homogéneo) es un ejemplo de simetría. El hecho de que el tiempo es homogéneo es otro ejemplo. Estas simetrías quieren decir, simplemente, que un experimento físico realizado en Boston esta primavera dará el mismo resultado que el mismo experimento realizado en Moscú, por ejemplo, en el próximo otoño.

En otras palabras, los físicos creen, en la actualidad, que las leyes más fundamentales de la física, las leyes de conservación y los principios de invariancia, se basan en aquellos fundamentos de nuestra realidad que son tan básicos que, por esa misma razón, pasan inadvertidos. Eso no significa (probablemente) que los físicos hayan necesitado tres siglos para darse cuenta de que un objeto trasladado, como un teléfono colocado en cualquier parte del país, no distorsiona su forma o tamaño (el espacio es homogéneo), ni tampoco se invierte y pone dentro lo que está fuera (el espacio es isotrópico), ni envejece dos semanas más en un lugar que en otro (el tiempo es homogéneo). Todo el mundo sabe que así es como está construido nuestro mundo físico. El dónde y el cuándo se realiza un experimento subatómico no son datos críticos. Las leyes de la física no cambian con el lugar ni con el tiempo.

Sin embargo, esto sí podría significar que a los físicos les ha llevado trescientos años darse cuenta que las estructuras matemáticas más simples y bellas son aquellas que están basadas en esas condiciones tan obvias como modestas.

En términos generales podemos decir que la física teórica se ha dividido en dos escuelas. Una de ellas sigue la antigua senda del pensamiento y la otra una nueva forma de pensar. Los físicos que continúan en la senda antigua siguen su búsqueda de los «bloques» elementales con los que se construye el universo, pese al lío de la sala de los espejos (pág. 195). Para esos físicos, en la actualidad el más firme candidato a «bloque definitivo con el que se construye el universo» es el quark. Un quark es un tipo de partícula hipotética teorizada por Murray Gell-Mann en 1964. Ha sido bautizada con una palabra utilizada en el libro de James Joyce, *Finnegan's Wake*.

Según la teoría, todas las partículas conocidas están compuestas de varias combinaciones de pocos (doce) distintos tipos de quarks. Hasta ahora nadie ha encontrado un quark pese a que son muchos los que lo buscan. Se trata de una partícula extraordinariamente esquiva (como muchas partículas ahora conocidas lo fueron en el pasado), con varias características

muy extrañas. De acuerdo con la teoría, por ejemplo, se dice que los quark tienen 1/3 de unidad de carga eléctrica. Nunca hasta ahora se ha descubierto una carga que no se presente por unidades completas. La gran caza de quark puede hacerse muy emocionante en un próximo futuro; independientemente de lo que pueda descubrirse en el futuro una cosa ya puede darse por cierta: el descubrimiento del quark abrirá una nueva área de investigación que buscará respuesta a la pregunta: «¿De qué están hechos los quarks?»

En cuanto a los físicos que siguen las nuevas sendas del pensamiento, buscan tan diferentes perspectivas de aproximación al conocimiento de los fenómenos subatómicos que no resulta posible presentarlos todos. Algunos de ellos creen que lo único que tiene existencia real es el espacio y el tiempo. Según esta teoría los actores, acción y escenario son manifestaciones de una geometría cuatridimensional fundamental. Otros (como David Finkelstein) están explorando procesos que están «más allá del tiempo», procesos de los cuales se derivan el espacio y el tiempo, que es el tejido auténtico de la realidad experimental. De momento esas teorías son especulativas. No pueden ser probadas (demostradas matemáticamente).

La teoría de la Matriz-S es el intento que hasta ahora ha conseguido mayor éxito en el interminable síndrome de la búsqueda de la definitiva partícula última. En esta teoría lo importante es la danza y no los danzarines. La teoría de la Matriz-S se diferencia porque sitúa el énfasis en la interacción en vez de en las propias partículas.

«Matriz-S» es la abreviatura de «Scattering Matrix» o sea matriz de dispersión. El *scattering* es lo que le ocurre a las partículas cuando chocan entre sí. Una matriz es un tipo de tabla matemática. Una Matriz-S es una tabla de probabilidades (pág. 120).

Cuando las partículas subatómicas chocan normalmente son varias las cosas que pueden ocurrir. Por ejemplo, la colisión de dos protones puede crear:

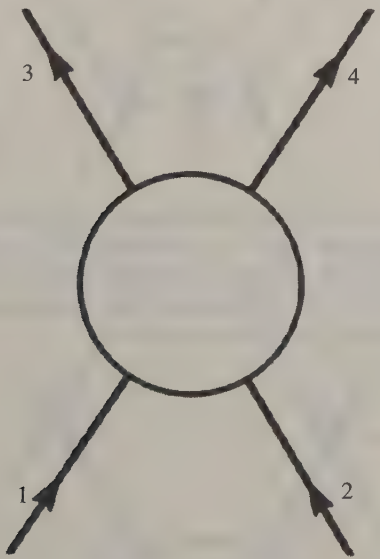
(1) un protón, un neutrón y un pion positivo,
(2) un protón, una partícula lambda y un kaón positivo,
(3) dos protones y seis distintos piones,
(4) numerosas otras combinaciones de partículas subatómicas.

Cada una de esas combinaciones posibles (que son combinaciones que no violan las leyes de conservación) ocurre con determinada probabilidad. En otras palabras, algunas de ellas pueden ocurrir con mayor frecuencia que otras. A su vez, las probabilidades de varias combinaciones dependen de cosas tales como, por ejemplo, la intensidad del momento inicial transportado a la zona de colisión.

En una Matriz-S todas estas probabilidades están tabuladas de tal modo que podemos observar o calcular los posibles resultados de cualquier colisión, conjuntamente con sus probabilidades, si sabemos qué tipo de partículas son las que chocan y el momento que poseen. Desde luego hay tantas combinaciones de partículas posibles (cada una de las cuales puede arro-

jar una gran variedad de resultados), que una matriz (tabla) completa que contenga todas las probabilidades de todas las posibles combinaciones de partículas resultaría enorme y, en realidad, tal tabla no ha sido hecha. Esto no implica un problema inmediato, puesto que los físicos sólo se interesan en una pequeña parte de la Matriz-S a un mismo tiempo (por ejemplo, la parte que se refiere a las colisiones de dos protones). Estas partes de la Matriz-S total son llamadas elementos de la Matriz-S. La mayor limitación de la teoría de la Matriz-S es que, en el presente, sólo es de aplicación a las partículas pesadas interactuantes (mesones y bariones) que, en conjunto, se denominan *hadrones*.

A continuación ofrecemos un diagrama de Matriz-S de una interacción subatómica.

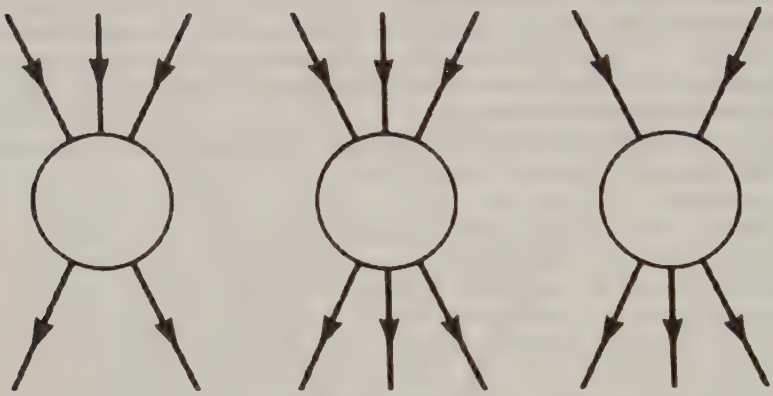


Es muy sencillo. La zona de colisión es el círculo. Las partículas una y dos entran en colisión y las partículas 3 y 4 escapan del área de colisión. El diagrama no dice nada de lo que ocurre en el punto de colisión. Sólo muestra qué partículas entran en interacción y qué partículas escapan de ella.

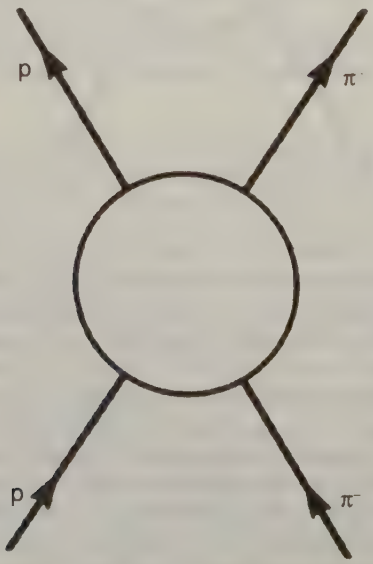
Un diagrama de Matriz-S no es un diagrama de espacio-tiempo. No nos describe la posición de las partículas ni en el espacio ni en el tiempo. Esto es intencionado porque no conocemos la exacta posición de las partículas interactuantes. Hemos elegido medir sus momentos y, por ello, su posición nos es desconocida (el principio de incertidumbre de Heisenberg). Por esta razón, los diagramas de la Matriz-S sólo indican que una interacción tiene lugar en cierta zona (dentro del círculo). Son una representación

puramente simbólica de la interacción de las partículas.

No todas las interacciones involucran solamente a dos partículas iniciales y dos partículas finales. A continuación ofrecemos otras formas que puede tomar un diagrama de Matriz-S.

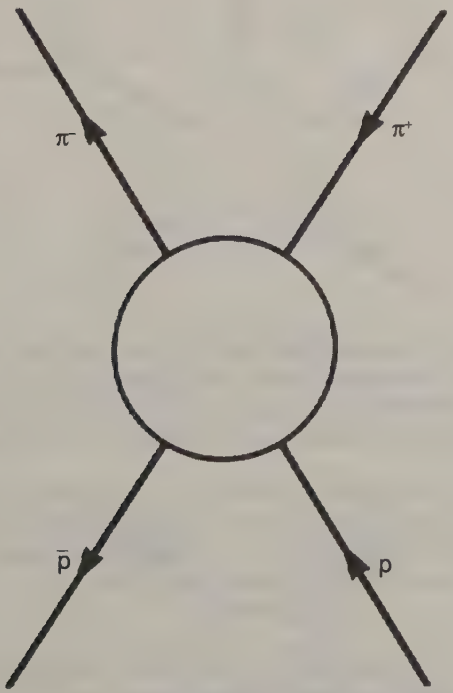


Al igual que ocurre con los diagramas de Feynman, los diagramas de la Matriz-S pueden hacerse girar. La dirección de las puntas de las flechas distingue las partículas de las anti-partículas. Seguidamente ofrecemos un diagrama de la Matriz-S de un protón que choca con un pión negativo para producir un protón y un pión negativo.



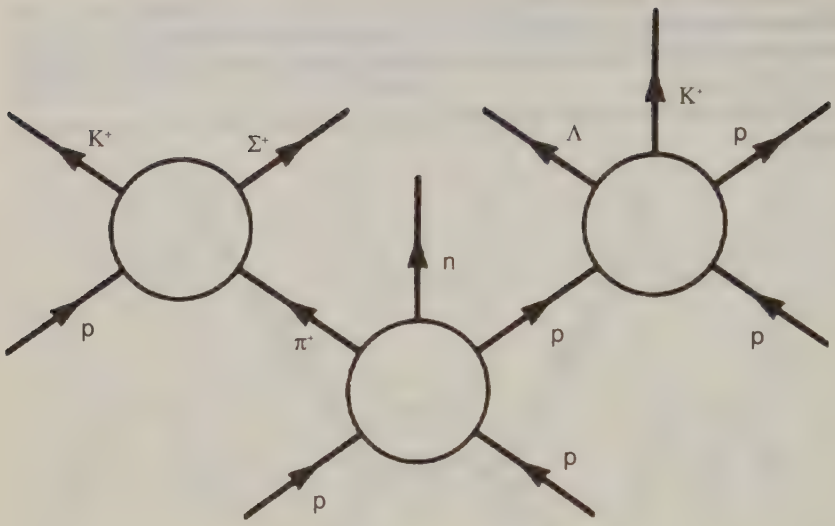
Cada vez que se gira un diagrama, representa una distinta interacción. Si damos la vuelta a este diagrama se transforma en el diagrama de la aniquilación de un protón-antiprotón, con la producción de un pion negativo y un pion positivo.

(El pion positivo es la anti-partícula del pion negativo en una reacción original.)

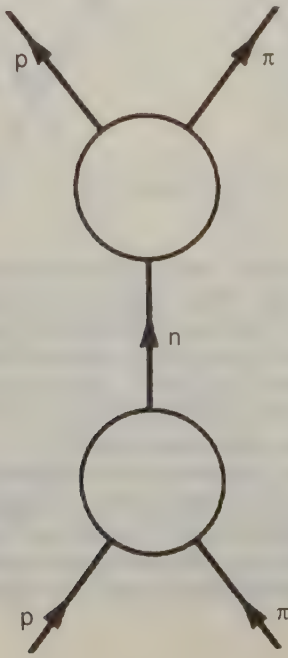


Cada diagrama al ser girado refleja otra interacción posible. Este diagrama puede ser girado cuatro veces. Todas las partículas que pueden ser trazadas, rotando un simple elemento de la Matriz-S, están íntimamente relacionadas entre sí. De hecho, *todas las partículas representadas en un diagrama de Matriz-S (incluyendo las que se descubren al girar el diagrama) están definidas unas en términos de otras.* Cuáles de ellas son las «elementales», es una cuestión carente de importancia.

Dado que las partículas resultantes de una interacción, frecuentemente, quedan involucradas en otras interacciones, los elementos separados de la Matriz-S reunidos diagramáticamente forman una red de interacciones relacionadas. Cada red, como cada interacción, está asociada con una cierta probabilidad. Y estas probabilidades pueden ser calculadas.

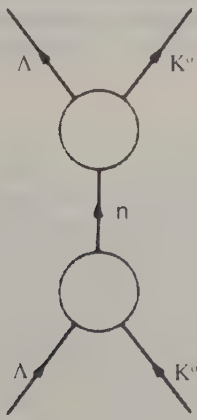


De acuerdo con la teoría de la Matriz-S, las partículas son *estados intermedios* en una red de interacciones. Las líneas del diagrama no son las líneas universo de diferentes partículas. Las líneas en un diagrama de Matriz-S de una red de interacción son «canales de reacción» por los cuales



transcurre la energía. Un «neutrón», por ejemplo, es un «canal de reacción». Puede estar formado por un protón o un pion negativo.

Si se dispone de más energía, sin embargo, el mismo canal puede ser creado con una partícula lambda y un kaón neutro, así como varias otras diversas combinaciones de partículas.



En resumen, la teoría de la Matriz-S está basada en *sucesos* y no en cosas.* ** Los bailarines dejan de estar aparte como entes significativos. De hecho, esos bailarines ni siquiera son definidos excepto en términos relativos (de unos en relación a los otros). En la teoría de la Matriz-S, sólo existe la danza.

Nos hemos alejado un buen trecho de Newton y su proverbial manzana. Pero a pesar de ello no hay que olvidar que las manzanas son una parte real del mundo aparente. Podemos comernos una manzana y al hacerlo nos damos cuenta de quién se está comiendo la manzana y quién está siendo comido, como algo distinto y separado de la acción de comer.

La idea de que los objetos existen separados de los sucesos es parte de

* La teoría de la Matriz-S se ocupa de sucesos en el sentido de resultados generales de un proceso más que en el sentido de cosas individuales que suceden durante el proceso de colisión. Hay entes bien definidos en los canales de entrada y salida (o la Matriz-S no sería definida), pero en la región de la interacción en sí (dentro del círculo) todo está confuso y no especificado. «La filosofía de la Matriz-S — según Brian Josephson, de la Universidad de Cambridge — es una declaración de la imposibilidad de un análisis en detalle».

** Una buena explicación de la Teoría de la Matriz-S, está incluida en el libro *The Tao of Physics,* de F. Capra, Berkeley, Shambala, 1975, págs. 261 a 276.

la red epistemológica con la cual engañamos nuestra particular forma de experiencia. Esta idea nos resulta querida porque la hemos aceptado, sin ponerla en duda, como base de nuestra realidad. Incluye de manera profunda la forma como nos vemos a nosotros mismos. Es la raíz profunda de nuestro aprisionador sentido de separación de los demás y del medio ambiente.

La historia del pensamiento científico, si es que nos enseña algo, es la locura de aferrarnos de manera tan firme a las ideas. En este terreno es un eco de la sabiduría oriental que nos enseña que es una locura aferrarse a algo.

ILUMINACIÓN

MÁS QUE AMBOS

¿Qué tiene de común la física con la iluminación? La física y el estado de iluminación pertenecen, aparentemente, a dos terrenos distintos que están separados para siempre. Una de ellas (la física) pertenece al mundo externo de los fenómenos físicos y la otra (iluminación) pertenece al mundo interno de las percepciones. Sin embargo, una observación más detallada nos revela que la física y la iluminación no son tan incongruentes entre sí como podríamos pensar. En primer lugar tenemos el hecho de que sólo podemos observar los fenómenos físicos a través de nuestras percepciones. Además de este punto, tan obvio, hay otras similitudes intrínsecas.

Iluminación significa apartarse de los vínculos del concepto («velos de ignorancia») para percibir de manera directa la inexpresable naturaleza de la realidad no diferenciada. La «realidad no-diferenciada» es la misma realidad que dice que nosotros formamos parte de «el ahora», que siempre fuimos parte de él y siempre seremos parte de él. La diferencia está en que nosotros no vemos ese ahora del mismo modo como lo ve la persona iluminada. Como todo el mundo sabe (?), las palabras sólo *representan (re-presentan)* algo. Ese algo no son cosas reales, sino simplemente *símbolos*. De acuerdo con la filosofía de la iluminación *todo* (cada *cosa*) es un símbolo. La realidad de los símbolos es una realidad ilusoria. Y sin embargo, ésa es la realidad en que nosotros vivimos.

Aun cuando la realidad no-diferenciada es inexpresable, podemos hablar de ella (usando más símbolos). El mundo físico, como aparece al no iluminado, consiste en muchas partes separadas. Pero estas partes no están realmente separadas. De acuerdo con los místicos de todo el mundo, cada momento de iluminación (gracia-revelación-samadhi-satori) revela que cada cosa — todas las partes separadas del universo — son manifestaciones de la misma totalidad. Hay solamente *una* realidad y es completa y unificada. Es una.

Ya hemos aprendido que para comprender la física cuántica se requiere una modificación de los conceptos ordinarios (como por ejemplo la idea de que algo no puede ser onda *y* partícula). Ahora veremos que la física, quizá, requiere una alteración más completa de nuestro proceso ideológico de lo que habíamos pensado nunca, que en realidad jamás podremos llegar

a concebir. Del mismo modo que previamente hemos visto que los fenómenos del quanto parecen tomar decisiones, «conocer» lo que está sucediendo en otra parte (pág. 77), ahora veremos como los fenómenos cuánticos pueden estar conectados tan íntimamente que las cosas que antaño rechazamos como «ocultas», pueden convertirse en objeto corriente de serias consideraciones entre los físicos.

En resumen, tanto en la necesidad de descartar los procesos ordinarios del pensamiento (y definitivamente, pasar «más allá del pensamiento»), como en la percepción de la realidad como una unidad, el fenómeno de la iluminación y la ciencia física tienen mucho en común.

La iluminación es un estado del ser. Como todos los estados existenciales es indescriptible. Es un error de concepto (literalmente) confundir «la descripción» de un estado de ser con el propio estado en sí. Por ejemplo, tratemos de describir la felicidad. Es imposible. Podemos hablar sobre ella, podemos describir las perspectivas y los actos que, por lo corriente, acompañan a un estado de felicidad, pero no se puede describir la felicidad en sí. La felicidad y la descripción de la felicidad son dos cosas distintas.

La felicidad es un estado del ser. Eso significa que existe en el terreno de la experiencia directa. Es la percepción íntima de emociones y sensaciones que, indescriptibles en sí mismas, constituyen el estado de felicidad. La palabra «felicidad» es la etiqueta o el símbolo que pegamos a ese estado indescriptible. La «felicidad» pertenece al terreno de las abstracciones o conceptos. Un estado de ser es una experiencia. La descripción de ese estado es un *símbolo. Los símbolos y la experiencia no siguen las mismas reglas.*

El descubrimiento de que símbolos y experiencia no están regidos por las mismas leyes ha llegado a la ciencia física bajo el formidable título de lógica cuántica. La posibilidad de que partes distintas de la realidad (como uno de nosotros y una lancha a motor) pueda ser conectada de manera que nuestra experiencia común esté acorde con las leyes de la física se ha abierto paso en la física bajo el nombre de Teorema de Bell. El Teorema de Bell y la lógica cuántica nos lleva a los más lejanos rincones de la física teórica. Muchos físicos ni siquiera han oído hablar de ello. El Teorema de Bell y la física cuántica no tienen relación entre sí (corrientemente). Los que proponen una casi nunca están interesados en la otra. Pese a ello tienen mucho en común. Son lo que realmente es *nuevo* en física. Naturalmente la fusión láser (la fusión de átomos con rayos de luz de alta energía) y la búsqueda del quark son considerados por lo general las fronteras de la física teórica.* Y en cierto sentido lo son. Sin embargo, hay una gran diferencia entre esos proyectos y el Teorema de Bell y la lógica cuántica.

La investigación de la fusión láser y la gran caza de la partícula quark

* La fusión láser y la búsqueda del quark forman parte ya de la física experimental. Las nuevas fronteras de la física teórica parecen ser los *solitones* y la teoría del *gauge* unificado.

son tentativas dentro de los paradigmas existentes de la física. Pero la lógica cuántica y el Teorema de Bell son potencialmente explosivos, en términos de los marcos existentes. La primera, la lógica cuántica, nos lleva de vuelta a los campos de la experiencia desde el terreno de los símbolos. El segundo, el Teorema de Bell, nos dice que no existe nada que pueda llamarse «partes separadas». Todas las «partes» del universo están conectadas previamente de manera íntima y directa, cosa que antes sólo era pregonada por los místicos y otras personas científicamente poco aceptables.

El elemento matemático central en la teoría cuántica, el héroe de la historia, es la función de onda. La función de onda es el ente matemático que nos permite determinar los resultados posibles de una interacción entre un sistema observado y el sistema observador. La reconocida posición mantenida por la función de onda se debe no solamente a Erwin Schrödinger, su descubridor, sino también al matemático húngaro John von Neumann.

En 1932, Neumann publicó un famoso análisis matemático de la teoría cuántica bajo el título de *Fundamentos Matemáticos de la Mecánica Cuántica.*[1] En su libro, Neumann propone, efectivamente, la siguiente pregunta: «Si una función de onda, una pura creación matemática abstracta, debiera describir algo en el mundo real, ¿cómo sería ese algo?» La respuesta que deduce es exactamente la descripción de una función de onda que ya hemos explicado anteriormente (pág. 88).

Ese «extraño animal» así descrito cambiaría constantemente con el paso del tiempo. Cada momento será distinto del momento anterior. Será una composición de todas las posibilidades del sistema observado que la función describe. No se limitará a ser una mezcla de posibilidades, sino una especie de total orgánico, cuyas partes están cambiando de manera continua, pero que no obstante sigue siendo una-cosa-en-sí.

Esta cosa-en-sí continuará desarrollándose indefinidamente hasta que se haga una observación (una medición) del sistema observado que la función representa. Si el «sistema observado» es un fotón que «se propaga en aislamiento», la función ondulatoria que representa a ese fotón contendría todos los resultados posibles de la interacción del fotón con un instrumento de medida, como por ejemplo una placa fotográfica.* (Por ejemplo, las posibilidades contenidas en la función de onda son que el fotón sea detectado en la zona A de la placa fotográfica, que el fotón sea detectado en la zona B de la placa fotográfica, o que el fotón sea detectado en la zona C de la placa).

Una vez que el fotón es puesto en movimiento, la función de onda asociada con él continuará desarrollándose de acuerdo con una ley causal (la

* Hay varias interpretaciones del formalismo de la mecánica cuántica. Von Neumann pensó que solamente los conjuntos, por ejemplo grupos de fotones, tendrían funciones y no ocurría así con las partículas por separado. Un número reducido de físicos sigue defendiendo, todavía, ese punto de vista, aunque la mayoría no lo hace así.

ecuación de onda de Schrödinger), hasta que los fotones interactúan con el sistema observador. En ese instante una de las posibilidades contenidas en la función de onda se hará realidad y las demás posibilidades cesarán de existir. Simplemente desaparecerán. La función de onda, ese extraño animal que von Neumann estaba tratando de describir, «colapsaría»; el colapso de esa particular función de onda vendría a significar que uno de los posibles resultados de la interacción fotón/aparato de medición se convertiría en *uno* (ocurre) y las probabilidades de cada una de las demás posibilidades se convertiría en *cero* (dejan de seguir siendo posibles). Al fin y al cabo un fotón sólo puede ser detectado en un lugar determinado en un momento determinado.

La función de onda, de acuerdo con este punto de vista, ocupa ese extraño rango medio entre idea y realidad, donde todas las cosas son posibles pero ninguna real. Heisenberg relaciona esta posición con la *potencia* de Aristóteles.

Esta manera de considerar el asunto ha dado forma al idioma, y con ello al pensamiento, de la mayor parte de los físicos, incluso de aquellos que consideran que la función de onda es una ficción matemática, una creación abstracta cuya manipulación, en cierto modo, permite obtener las probabilidades de sucesos reales que ocurren en un auténtico (*versus* matemático) espacio y tiempo.

No es necesario decir que esta interpretación ha causado una gran confusión y que es tan poco clara hoy como lo era en la época de von Neumann.

Por ejemplo, ¿cuándo colapsa exactamente la función de onda? (El problema de la medición.) (Pág. 91.) ¿Ocurre cuando el fotón golpea la placa fotográfica? ¿Lo es cuando la placa es revelada? ¿Cuando nosotros miramos la placa ya revelada? Exactamente, ¿qué significa ese colapso de la función? ¿Dónde «vivía» la función de onda antes de producirse ese colapso? Las preguntas podrían continuar así. El concepto de que la función de onda puede ser descrita como una cosa real es generalmente el punto de vista atribuido a Neumann. Sin embargo, la descripción de la función de onda, de las dos que tratan de comprender los fenómenos cuánticos, que von Neumann explica en *The Matematical Foundations of Quantum Mechanics.*

La segunda forma de abordar el problema, a la cual von Neumann dedicó mucho menos tiempo, es un re-examen del lenguaje necesario para expresar los fenómenos cuánticos. En la sección «Proyecciones como proposiciones», escribió:

> «... la relación entre las propiedades de un sistema físico, por una parte y las proyecciones (la función de onda) por la otra, hace posible una especie de cálculo lógico. Sin embargo, en contraste con los conceptos de la lógica corriente, este sistema se extiende a los conceptos de «decisión simultánea» (el principio de incertidumbre) que es característico de la mecánica cuántica.»[2]

La sugerencia de que las propiedades recientes de la teoría cuántica pueden ser utilizadas para construir un «cálculo lógico» que esté en contraste con los conceptos de la lógica ordinaria es lo que von Neumann consideró una alternativa para describir las funciones de onda como cosas reales.

Sin embargo, la mayor parte de los físicos han adoptado una tercera explicación de las funciones de onda. Las rechazan y pasan a considerarlas construcciones puramente matemáticas, ficciones abstractas que no representan nada en absoluto en el mundo de la realidad. Desgraciadamente, esta explicación deja sin respuesta para siempre aquello de «entonces, ¿cómo pueden las funciones de onda predecir de manera tan exacta probabilidades que pueden ser verificadas mediante la experiencia?» En realidad, ¿cómo pueden las funciones de onda predecir *algo,* cuando se las define como algo sin la menor relación con la realidad física? Ésta es la versión científica de la cuestión filosófica: ¿Cómo puede la mente influir sobre la materia?

El segundo modo de von Neumann para enfrentarse al paradójico rompecabezas de los fenómenos cuánticos lo arrastró mucho más allá de las fronteras de la física. Su breve obra señala hacia una fusión de la ontología, epistemología y sicología que apenas está comenzando a emerger. En resumen, el problema está en el lenguaje, dijo von Neumann. En ello radica el germen de lo que estaba llamado a ser la lógica cuántica.

Al señalar el problema del lenguaje, von Neumann puso su dedo en el porqué de las grandes dificultades que existen para responder a la cuestión de qué es la mecánica cuántica. Mecánica es el estudio del movimiento de los quantos, pero ¿qué son los quantos? De acuerdo con el diccionario un quanto es una cantidad de algo. Pero la verdadera cuestión es: ¿una cantidad de qué?

Un quanto es un trozo de acción (¿un trozo de acción?) El problema es que un quanto puede ser de naturaleza ondulatoria y, de nuevo, volver a ser de naturaleza corpuscular, que es precisamente lo que no es una onda. Más aún, cuando un quanto es de naturaleza corpuscular (de partícula) no es semejante a una partícula en el sentido ordinario de la palabra. Una «partícula» subatómica no es una «cosa». (No podemos determinar simultáneamente su posición y su momento.) Una «partícula» subatómica (quanto) es una serie de relaciones, o un estado intermedio. Puede ser roto, pero de su ruptura surge un mayor número de partículas que las elementales que había en el original. «... Aquellos que no se sientan asombrados, conmovidos, la primera vez que se enfrenten con la teoría quántica — dijo Niels Bohr —, es porque, con toda seguridad, no la han entendido.»[3]

La teoría cuántica no es difícil de explicar a causa de su complejidad. Es difícil de explicar porque las palabras que tenemos que utilizar para comunicar su explicación no son las adecuadas para explicar los fenómenos del quanto. Eso era algo muy sabido, y muy discutido, por los fundadores de la teoría cuántica. Max Born, por ejemplo, escribió lo siguiente:

«El definitivo origen de la dificultad está en el hecho (o principio filosófico) de que nos vemos obligados a utilizar palabras del idioma común cuando deseamos describir un fenómeno de otro modo que por el análisis lógico o matemático, por una imagen que despierte la imaginación. El lenguaje común ha crecido con la experiencia cotidiana y nunca podrá sobrepasar esos límites. La física clásica se ha restringido a sí misma en el uso de los conceptos de este tipo. Al analizar los movimientos visibles ha desarrollado dos modos de representarlos mediante procesos elementales: partículas en movimiento y ondas. No hay otra forma de dar una descripción gráfica de los movimientos. Incluso tenemos que aplicarla a la región del proceso atómico, donde la física clásica se derrumba.»[4]

Éste es el punto de vista mantenido por la mayor parte de los físicos: tropezamos con problemas al explicar los fenómenos subatómicos cuando tratamos de visualizarlos. Por consiguiente, es necesario evitar explicaciones en términos de «lenguaje común» y restringirnos al «análisis matemático». Para aprender la física de los fenómenos subatómicos, primero tenemos que aprender matemáticas.

—¡No, eso no es así! — dice David Finkelstein, Director de la *School of Physics,* del Instituto de Tecnología de Georgia. Las matemáticas, como el inglés, son un idioma. Están construidas por símbolos. Lo máximo que se puede conseguir de los símbolos es una descripción aproximada, pero incompleta.»[5] Un análisis matemático de los fenómenos subatómicos no es mejor cualitativamente, que cualquier otro análisis simbólico, porque *los símbolos no siguen las mismas reglas que la experiencia.* Siguen reglas propias. En resumen, el problema no está *en* el lenguaje; el problema *es* el lenguaje.

La diferencia entre experiencia y símbolo es la diferencia entre mito y logos. Logos imita, pero nunca puede reemplazar. Es un substituto de la experiencia. Logos es la construcción artificial de símbolos muertos, que imita a la experiencia en forma biunívoca. La teoría clásica de la física es un ejemplo de esa correspondencia biunívoca entre la teoría y la realidad.

Einstein argumentó que ninguna teoría física podía considerarse completa en tanto todos los elementos del mundo real no tuvieran una definida contrapartida en la teoría. La teoría de la relatividad de Einstein es la última de las grandes teorías clásicas (pese a que es una parte de la nueva física), debido a que está estructurada de modo que se corresponde, en relación uno-a-uno, con los fenómenos. Lo que afirmaba Einstein, precisamente, era que una teoría física no era completa si no mantenía esta correspondencia biunívoca con los fenómenos.

«Cualquiera que sea el significado asignado al término *completo,* el siguiente requerimiento parece ser de todo punto necesario para una teoría completa: *cada uno de los elementos de la realidad física tiene que tener una contrapartida en la teoría física.*»[6]

La teoría cuántica no mantiene esta correspondencia de uno-a-uno entre la teoría y la realidad (no puede predecir acontecimientos a nivel individual, sólo probabilidades). De acuerdo con la teoría cuántica, los sucesos individuales son ocurrencias fortuitas. No hay elementos teóricos en la teoría cuántica que se correspondan con cada suceso individual que realmente ocurre. Por lo tanto, la teoría cuántica, de acuerdo con las ideas de Einstein, es incompleta. Ése fue uno de los puntos de partida básicos para el famoso debate Bohr-Einstein.

El mito señala hacia la experiencia pero no reemplaza la experiencia. Mito es lo opuesto a intelectualidad. Los cantos de ceremonia en los rituales primitivos (como en un partido de fútbol) son buenos ejemplos de mitos. Dotan a la experiencia con valores, originalidad y vitalidad, pero no la reemplazan.

Hablando teológicamente, logos es el pecado original, el comer del fruto del árbol de la sabiduría, la expulsión del Jardín del Edén. Hablando históricamente, logos es el desarrollo de la revolución literaria, el nacimiento de la tradición escrita partiendo de la tradición oral. Desde cualquier punto de vista logos (literalmente) es letra muerta. «Conocimiento» es una palabra cortés para una imaginación muerta pero no enterrada. Esta afirmación hace referencia al logos.

Nuestro problema, según Finkelstein, es que no podemos comprender los fenómenos subatómicos, o *cualquier otro tipo de experiencia*, mediante el uso exclusivo de los símbolos. Y como observó Heisenberg:

> «Los conceptos que inicialmente se formaron mediante la abstracción de situaciones particulares o complicadas experiencias adquieren *vida propia.*»[7] (La cursiva es nuestra.)

Este perderse en la interacción de los símbolos es algo análogo a confundir las sombras en la pared de la cueva con el mundo real existente fuera de ella (es decir, con la experiencia directa). La respuesta adecuada a esta complicada situación es tratar de estudiar los fenómenos subatómicos al mismo tiempo como una experiencia en general, pero con el lenguaje del mito, en vez de con un lenguaje del logos, o sea del conocimiento.

Finkelstein lo expresa de este modo:

> «Si se intenta considerar al quanto como un punto, una mota diminuta de algo, uno se queda atrapado. Se están formando modelos de la lógica clásica. Y el punto de máxima importancia está en que no existe una representación clásica del quanto. Tenemos que aprender a vivir y a regirnos por la experiencia.
>
> Pregunta: ¿Cómo se comunica la experiencia?
>
> Respuesta: No se comunica. Pero al explicar cómo se hacen los quantos y cómo se miden, se permite a los demás poseerla.»[8]

Según Finkelstein, un idioma de mitos, un lenguaje que aluda a la experiencia, pero que no trate de reemplazarla ni de moldear nuestra percepción, es el auténtico lenguaje de la física. Esto es así porque no solamente el lenguaje que utilizamos para comunicar nuestra experiencia diaria sino también el matemático siguen una determinada serie de reglas (la lógica clásica). *La experiencia en sí no está sometida a esas reglas.* La experiencia sigue una serie de reglas mucho más permisivas (lógica cuántica). La lógica cuántica no solamente resulta mucho más excitante e interesante que la lógica clásica, sino que además es más real. No se basa en la forma como imaginamos las cosas, sino en la forma como las *experimentamos.*

Cuando tratamos de describir las experiencias con la lógica clásica (y eso es lo que hemos venido haciendo desde que aprendimos a escribir) colocamos una serie de persianas, por decirlo así, que no sólo restringen nuestro campo de visión sino que lo distorsionan. Esas persianas son la serie de reglas conocidas como lógica clásica. Estas reglas están bien definidas. Son muy sencillas. El único problema está en que no se corresponden con la experiencia.

La diferencia más importante entre las reglas de la lógica clásica y las reglas de la lógica cuántica involucra a la ley distributiva. Esta ley dice que «A y B o C» es lo mismo que «A y B, o A y C». En otras palabras, decir «Arrojo una moneda y sale cara o cruz» significa lo mismo que si digo: «Tiro la moneda y sale cara», o «Tiro la moneda y sale cruz». La ley distributiva, que es uno de los fundamentos de la lógica clásica, *no es aplicable a la lógica cuántica.* Éste es uno de los aspectos más importantes aunque menos entendidos de la obra de Neumann. En 1936, von Neumann y su colega Garret Birkhoff publicaron un escrito que ponía los fundamentos de la lógica cuántica.[9]

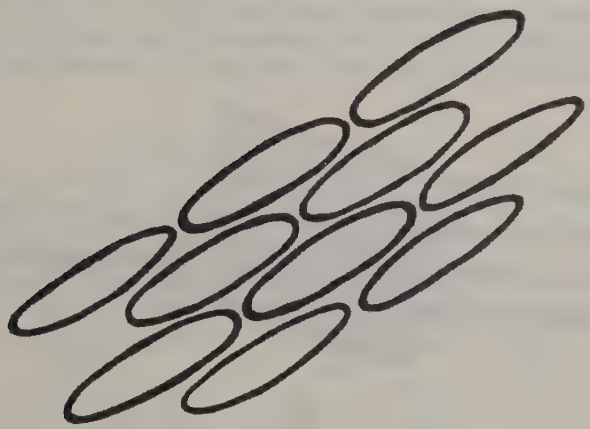
En su publicación, a fin de refutar la ley distributiva, utilizaban un fenómeno familiar (para los físicos). Al hacerlo así demostraron matemáticamente que es imposible describir la experiencia (incluidos los fenómenos subatómicos) con la lógica clásica, porque el mundo real sigue reglas distintas. Las reglas que sigue la experiencia son las llamadas de la lócuántica. Las que siguen los símbolos son las que se denominan de la lógica clásica.

Finkelstein utiliza una versión del ejemplo de Birkhoff y von Neumann para desmentir la ley distributiva. La demostración de Finkelstein sólo requiere tres trozos de plástico. Estas tres piezas de plástico están contenidas en el sobre que va unido a la cubierta posterior de este libro. Sáquense del sobre y examínense.* Obsérvese que son transparentes y teñidas con

* Se me hizo necesario decidir entre incluir los mencionados polarizadores en el libro o conservar el precio de este libro dentro del alcance de cada posible lector. Finalmente decidí omitir los polarizadores. Sin embargo, pese a que es imposible que las palabras expresen la experiencia, he conservado el texto como lo escribí originalmente para mantener el tono de la demostración. (En las tiendas

un color semejante al de las gafas de sol. En realidad, piezas de este mismo material, aunque de mayor grosor, son las que se utilizan para las gafas de sol. Son muy efectivas en la reducción del brillo y el deslumbramiento debido a sus peculiares características. Se dice de ellas que están polarizadas y las gafas de sol que las usan se llaman gafas polaroid.

Los polarizadores son un tipo especial de filtros de luz. Generalmente están hechos con planchas de material plástico estirado en el cual todas las moléculas han sido alargadas y estiradas en la misma dirección. Vistas bajo aumento las moléculas tienen un aspecto semejante a éste:



Estas moléculas largas, extendidas, son responsables de la polarización de la luz que pasa a través de ellas.

La polarización de la luz puede entenderse con mayor facilidad como un fenómeno ondulatorio. Las ondas luminosas procedentes de una fuente ordinaria, como por ejemplo el sol, emanan de diversa forma, verticales, horizontales y en posiciones intermedias de todo tipo. Esto significa no sólo que la luz radia desde una fuente en todas direcciones, sino también que, en cualquier rayo de luz, algunas de las ondas luminosas son verticales, otras son horizontales, algunas diagonales, y así sucesivamente. Para una onda de luz un polarizador es como una empalizada. El que la onda pueda cruzar la valla o no depende de que esté alineada adecuadamente con la valla o no. Si el polarizador está colocado verticalmente sólo podrán pasar las ondas de luz verticales. Todas las ondas luminosas que pasan por

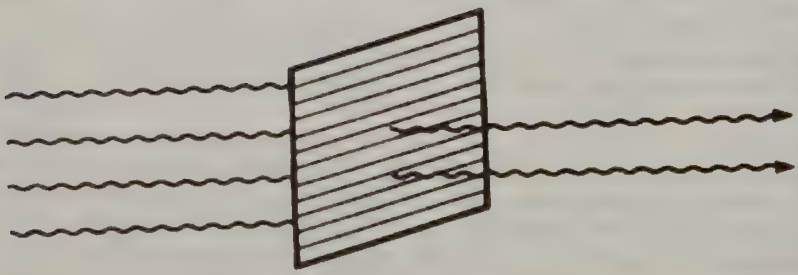
especializadas o a través de los catálogos científicos pueden adquirirse pequeños cristales de plástico polarizados muy baratos.)

un polarizador vertical se alinean verticalmente. Esta luz es llamada luz polarizada verticalmente.

Si el polarizador está alineado horizontalmente sólo la luz horizontal puede cruzarlo. Todas las ondas luminosas que pasan a través de un polarizador horizontal se alinean de manera horizontal. Esta luz se llama luz polarizada horizontalmente.

Independientemente de cómo se alinee el polarizador, todas las ondas de luz que pasen a través de él se alinean en el mismo sentido. Las flechas en los polarizadores indican la dirección en que pasa la luz a través de ellos y al hacerlo así se polariza (ésta es la razón por la cual se alargan las moléculas en la plancha de plástico).

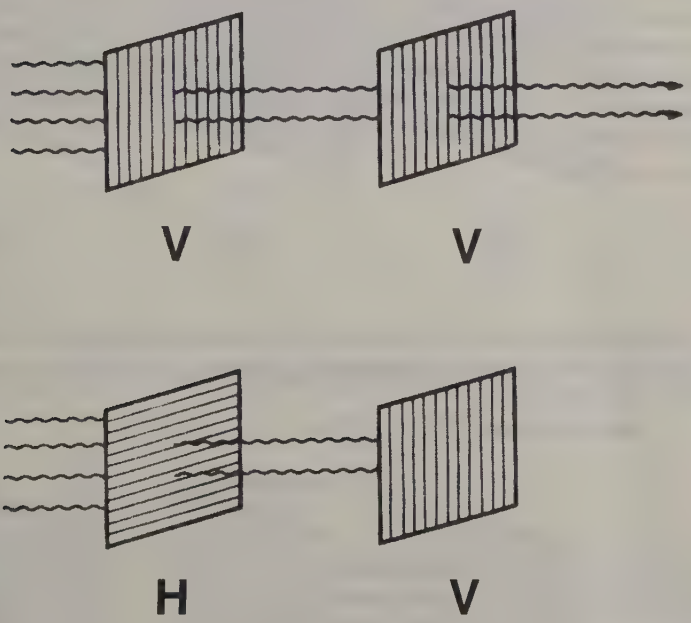
V



H

Tómese uno de los polarizadores y manténgase con las puntas de las flechas señalando hacia arriba (o hacia abajo). La luz que pasa por ese polarizador quedará polarizada verticalmente. Ahora tómese otro polarizador y manténgase detrás del primer polarizador con su flecha señalando también hacia arriba (o hacia abajo). Toda la luz que pasa por el primer polarizador pasa también por el segundo polarizador.

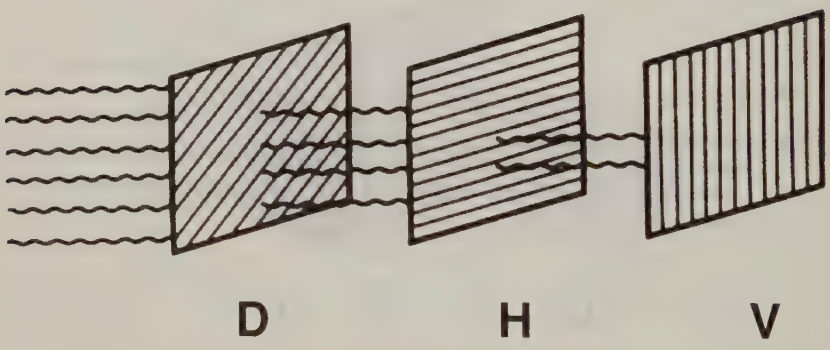
Ahora hagamos girar uno de los polarizadores de la vertical a la horizontal. Cuando se va haciendo girar ese polarizador, nótese que es cada vez menor la luz que pasa a través del par de polarizadores. Cuando uno de los polarizadores es vertical y el otro horizontal el par no deja pasar ninguna luz. En la figura, el primer polarizador elimina todas las ondas de luz menos las que están polarizadas horizontalmente, pero éstas son eliminadas por el segundo polarizador, que deja pasar solamente a la luz polarizada verticalmente. El resultado es que no pasa ninguna luz a través



del segundo polarizador. No tiene la menor importancia que el primer polarizador sea vertical y el segundo polarizador sea horizontal o viceversa. El orden de los filtros no influye en absoluto. En los dos casos no pasa nada de luz a través del par.

Siempre que los dos polarizadores estén orientados formando ángulo recto entre sí, bloquean toda la luz. No importa cómo el par de polarizadores gire, unitariamente, siempre que se mantengan en ángulo recto entre ellos. En ese caso no pasará nunca ningún rayo de luz.

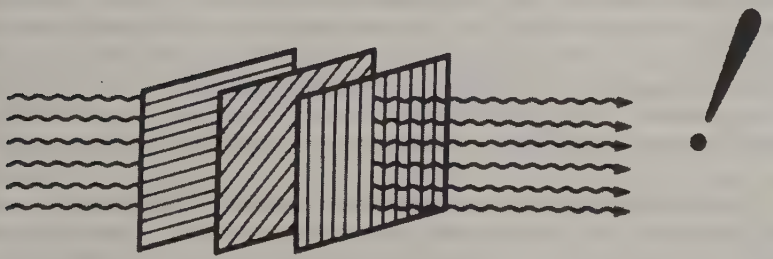
Conservando esto en la mente pasemos al tercer filtro. Situemos el tercer filtro de manera que polarice la luz *diagonalmente* y coloquémoslo delante de los dos polarizadores, el horizontal y el vertical. No ocurre nada. Si los dos primeros filtros (el polarizador vertical y el polarizador horizontal) bloquean toda la luz, el añadir un tercer filtro, lógicamente, en bien poco puede cambiar la situación.

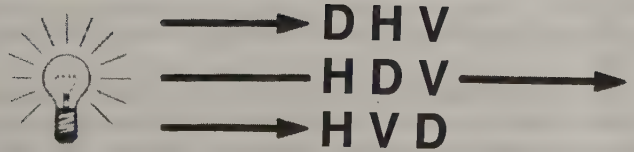


De manera semejante, si colocamos el polarizador diagonal al otro lado de la combinación tampoco ocurre nada. A través de los filtros no pasa en absoluto ninguna onda de luz.

Ahora llegamos a la parte interesante. Coloquemos el polarizador diagonal *entre* el polarizador horizontal y el vertical. *¡La luz pasa a través de los tres filtros cuando éstos se colocan en este orden!*

En otras palabras, una combinación de un polarizador vertical y uno horizontal significa para las ondas de luz una barrera como lo sería una plancha de madera. Si se coloca un polarizador diagonal detrás o delante de la combinación no ocurre nada y el fenómeno no resulta afectado. Sin embargo, si se coloca un polarizador diagonal *entre* el polarizador vertical y el horizontal, la luz pasa a través de los tres. Se quita el polarizador diagonal, situado en el centro y la luz desaparece de nuevo, bloqueada por los polarizadores vertical y horizontal.





¿Cómo puede ocurrir una cosa así?

De acuerdo con la mecánica cuántica, la luz polarizada diagonalmente no es una *mezcla* de la luz polarizada horizontalmente y la luz polarizada verticalmente. No podemos decir, simplemente, que las componentes horizontales de la luz polarizada diagonalmente pasan a través del polarizador

horizontal y las componentes verticales de la luz polarizada diagonalmente a través del polarizador vertical. De acuerdo con la mecánica cuántica, la luz polarizada diagonalmente es una cosa distinta, en sí misma. ¿Cómo puede una cosa-en-sí misma distinta cruzar tres filtros y no cruzar dos de ellos?

Si consideramos a la luz como un fenómeno corpuscular (de partícula), la paradoja se hace más gráfica. Literalmente, ¿cómo puede ser desdoblado un fotón para hacerlo pasar por un componente polarizador horizontal y después por un componente polarizador vertical? (Por definición esto no es posible.)

Esta paradoja está situada en el punto central de lo que distingue a la lógica cuántica de la lógica clásica. Su causa es nuestro proceso mental, que sigue las reglas de la lógica clásica. Nuestro intelecto nos dice que lo que estamos viendo es imposible (en ambos casos cada uno de los fotones debería quedar polarizado). Sin embargo, siempre que insertamos un polarizador diagonal, entre un polarizador horizontal y uno vertical, vemos la luz donde antes no la había. Nuestros ojos «ignoran» el hecho de que lo que estamos viendo es imposible. Esto se debe a que la experiencia no sigue las reglas de la lógica clásica, sino las reglas de la lógica cuántica.

Este experimento con la luz polarizada diagonalmente refleja la *verdadera* naturaleza de la experiencia. Nuestro proceso de pensamiento simbólico nos impone la elección ineludible «esto o lo otro». Nos enfrenta siempre con «esto o lo otro» o una combinación de ambos. Nos dice que la luz polarizada está polarizada verticalmente o está polarizada horizontalmente o es una combinación de luz polarizada verticalmente y horizontalmente. Éstas son las reglas de la lógica clásica, las reglas de los símbolos. En el terreno de la experiencia nada es «esto o lo otro». Hay siempre, al menos, una alternativa más. Y por lo general un número ilimitado de otras alternativas.

En relación con la teoría cuántica, Finkelstein lo expresó de este modo:

> «En el juego no intervienen ondas. La ecuación que rige este juego es una ecuación de onda, pero no se trata de que existan ondas que vayan de un lado para otro. (Éste es uno de los obstáculos de la mecánica cuántica.) Tampoco hay partículas que se muevan. Lo único que se mueve son los quantos, la tercera alternativa.»[10]

Para ser menos abstractos, supongamos que tenemos dos figuras de ajedrez, un alfil y un peón, por ejemplo. Si estas dos piezas macroscópicas de ajedrez siguieran las mismas reglas que los fenómenos cuánticos, no estaríamos en condiciones de decir que no hay otra elección que jugar el alfil o el peón. Entre los dos extremos «alfil» y «peón» existe una criatura llamada «alfeón». Un «alfeón» no es medio alfil y medio peón que se

han pegado juntos. Un «alfeón» es una «cosa-en-sí» distinta, con entidad propia, que no puede ser separada en sus componentes de alfil y sus componentes de peón, lo mismo que un cachorro que es medio mastín y medio pastor alemán no puede ser separado en sus componentes «mastín» y sus componentes «pastor alemán».

Entre los extremos alfil y peón hay más de un tipo de «alfeón». El «alfeón» que hemos descrito es media parte alfil y la otra media peón. Otro tipo de «alfeón» puede tener un tercio de alfil y dos tercios de peón. Y todavía podemos encontrar otro «alfeón» que sea tres cuartos de peón y un cuarto de alfil. De hecho en cada proporcionalidad entre las partes de uno y otro componente hay un diferente «alfeón».

Este alfeón es lo que los físicos llaman una superposición coherente. Una superposición es una cosa (o varias) añadida a otra. Una doble exposición, la maldición de los fotógrafos descuidados, es una superposición de una fotografía sobre otra. Pero una superposición coherente no es simplemente la superposición de una cosa sobre otra. *Una superposición coherente es una cosa-en-sí-misma tan distinta de sus componentes como éstos lo son entre sí.*

La luz polarizada diagonalmente es una superposición coherente de luz polarizada verticalmente y luz polarizada horizontalmente. Las superposiciones coherentes son muy abundantes en física. De hecho las superposiciones son el corazón de las matemáticas de la mecánica cuántica. Las funciones de onda son superposiciones coherentes.

Todo experimento de la mecánica cuántica tiene un sistema observado y cada sistema observado tiene una función de onda a él asociada. La función de onda de un determinado sistema observado (como por ejemplo un fotón) es la superposición coherente de todos los posibles resultados de una interacción entre el sistema observado y el sistema de medición (como por ejemplo una placa fotográfica). La evolución en el tiempo de esta superposición coherente de posibilidades está escrita por la ecuación de onda de Schrödinger. Utilizando esta ecuación, podemos calcular la forma de esa cosa-en-sí-misma, esa superposición coherente de posibilidades a la que llamamos función de onda de un instante determinado. Conociéndose eso, podemos calcular la *probabilidad* de cada posibilidad contenida en la función de onda en un determinado tiempo. Esto nos ofrece una función de probabilidad, que no es lo mismo que una función de onda pero que es calculada partiendo de una función de onda. De forma muy resumida, éstas son las matemáticas de la física cuántica.

En otras palabras, en las formulaciones matemáticas de la teoría cuántica nada es «esto» o «aquello» sin nada en medio. Los estudiantes graduados en física aprenden la técnica matemática de superponer cada «esto» sobre cada «aquello» de tal manera que el resultado no es el original «esto» ni tampoco el original «aquello», sino una cosa enteramente nueva llamada una superposición coherente de los dos.

De acuerdo con Finkelstein, una de las mayores dificultades concep-

tuales de la mecánica cuántica es la falsa idea de que esas funciones de onda (superposiciones coherentes) son *cosas* reales que se desarrollan, se derrumban, etc., etc. Por otro lado la idea de que las superposiciones coherentes son puras abstracciones que no representan nada de lo que encontramos en nuestras vidas diarias es incorrecta. Reflejan la naturaleza de la *experiencia.*

¿Cómo reflejan la experiencia las superposiciones coherentes? La experiencia pura jamás está restringida simplemente a dos posibilidades. Nuestra *conceptualización* de una situación dada puede crear la ilusión de que cada dilema tiene sólo dos salidas extremas, pero esta ilusión se debe a nuestra suposición de que la experiencia está sometida a las mismas reglas que los símbolos. En el mundo de los símbolos cada cosa es siempre esto o aquello. En el mundo de la experiencia hay más alternativas disponibles.

Por ejemplo, consideremos al juez que tiene que juzgar en tribunal a su propio hijo. La ley le permite dos veredictos: «Es culpable» o «es inocente». Para el juez, sin embargo, hay otro veredicto posible: «Es mi hijo.» El hecho de que se prohiba a los jueces el intervenir en casos en los que tengan interés personal es una admisión tácita de que la experiencia no está limitada a las categóricas alternativas de «culpabilidad» o «inocencia» (o «bueno» o «malo», «guapo» o «feo», etc.). Solamente en el terreno de los símbolos la elección es así de clara.

Durante la guerra civil libanesa, según se cuenta, un norteamericano que visitaba el país fue detenido por un grupo de pistoleros enmascarados. Una palabra equivocada podría haberle costado la vida.

—¿Es usted cristiano o musulmán? — le preguntaron.

—¡Soy *turista*! — les respondió.

La forma como hacemos las preguntas, frecuentemente limita ilusoriamente nuestras respuestas. En este caso, el temor del visitante por su propia vida rompió esos límites ilusorios. De manera semejante, la forma como *pensamos nuestros pensamientos,* nos limita a una perspectiva de «esto» o «aquello». La experiencia en sí nunca está tan limitada. Siempre hay una alternativa entre cada «esto» y cada «aquello». El reconocimiento de esta cualidad de experiencia es una parte integral de la lógica cuántica.

Los físicos participan en un tipo especial de danza que nos resulta extraña a la mayor parte de nosotros. El rondar en torno a ellos durante algún tiempo es como penetrar en otra cultura. Dentro de esa cultura cada declaración está sujeta al desafío: «¡Pruébelo!»

Cuando se le dice a un amigo: «Me encuentro estupendamente esta mañana!», no esperamos que nos diga: «¡Prueba que es así!» Sin embargo, cuando un físico dice: «La experiencia no está sujeta a las mismas reglas que los símbolos», provoca un coro de voces que dice «¡Prueba que es así!» En tanto que no esté en condiciones de hacerlo, hará preceder a sus observaciones de un «en mi opinión...». Los físicos no se muestran de-

masiado interesados en opiniones. Desgraciadamente, esto en muchas ocasiones los hace extraordinariamente estrechos de mente. Y si uno no está dispuesto a seguir *su* ritmo no aceptarán bailar con uno.

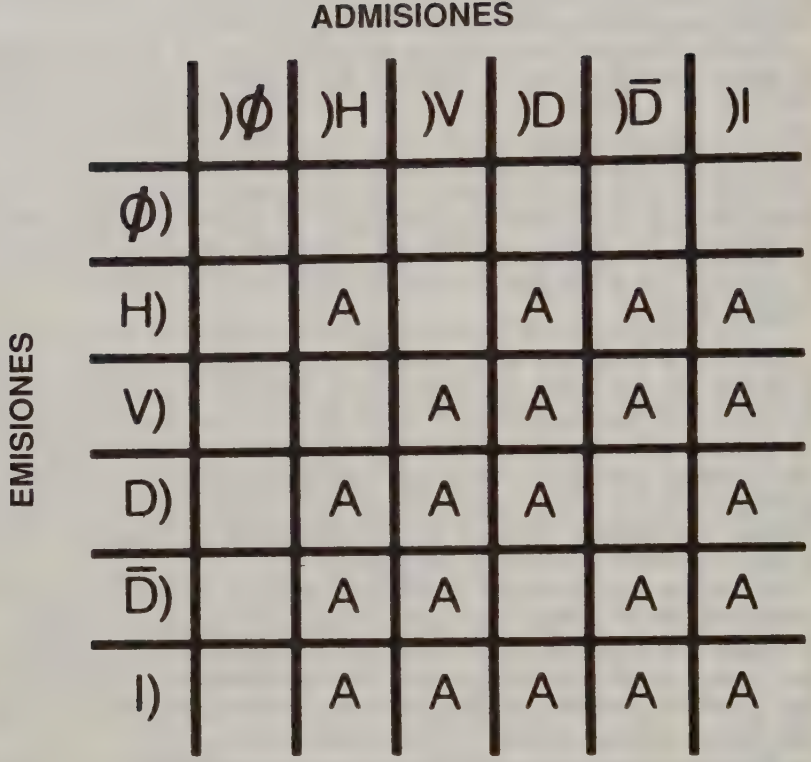
Su danza requiere una «prueba» de cada afirmación. Una «prueba» no es una verificación de que la afirmación sea «verdadera» (que ésa es la forma como es el mundo en realidad). Una prueba científica es una demostración matemática de que la afirmación en cuestión es lógicamente consistente. En el campo de las matemáticas puras, una afirmación no tiene importancia en absoluto con respecto a la experiencia. Sin embargo, si llega acompañada de una prueba autoconsistente, es aceptada, pero si no es así es rechazada. Lo mismo es válido con referencia a la física, excepto que la ciencia física exige, además, que la afirmación esté relacionada con la realidad física.

Todo esto se aplica a la relación entre la «verdad» de una afirmación científica y la naturaleza de la realidad. Una verdad «científica» no tiene nada que ver con «cómo es realmente la realidad». Una teoría científica es cierta si es autoconsistente y correlaciona correctamente la experiencia (predice acontecimientos). En resumen, cuando un científico dice que una teoría es cierta quiere decir que en efecto correlaciona correctamente la experiencia y, por consiguiente, es útil. Si substituimos la palabra «cierta», «verdadera», cada vez que la encontremos por la palabra «útil», la física aparecerá en su propia perspectiva.

Birkhoff y von Neumann crearon una «prueba» de que la experiencia viola las leyes de la lógica clásica. La prueba, desde luego, está fuertemente ligada a la experiencia. En particular se basa en lo que ocurre y lo que ocurre con varias combinaciones de luz polarizada. Finkelstein usó una versión ligeramente modificada de la prueba original de Birkhoff y von Neumann para expresar la lógica cuántica.

El primer paso de esta prueba consiste en experimentar con todas las combinaciones posibles de luz polarizada, horizontal, vertical y diagonalmente. En otras palabras, el primer paso consistía en hacer lo que nosotros ya hemos hecho: descubrir qué tipo de luz pasa a través de qué tipo de polarizadores. Obsérvese que la luz pasa a través de dos polarizadores verticales, dos polarizadores horizontales, dos polarizadores diagonales, un polarizador diagonal y uno horizontal, un polarizador diagonal y un polarizador vertical. Todas estas combinaciones son llamadas «transiciones permitidas», porque permiten el paso de la luz. De manera semejante, obsérvese que la luz no pasa a través de un polarizador horizontal y uno vertical, ni con ninguna otra combinación de polarizadores orientados entre sí en ángulo recto. Estas combinaciones son llamadas «transiciones prohibidas», porque la luz no pasa nunca.

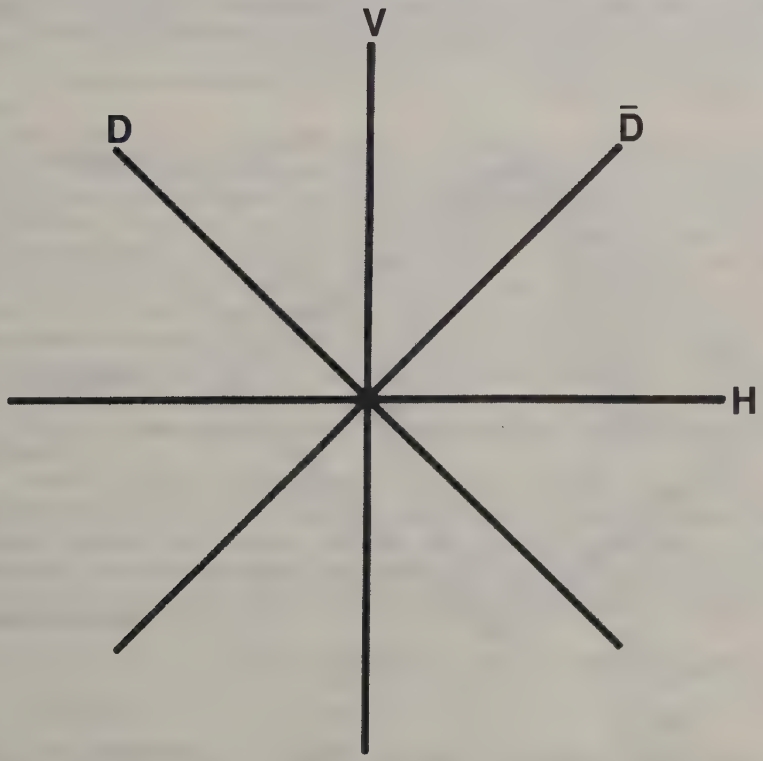
El segundo paso de la prueba es hacer una tabla de esta información, que se llama Tabla de Transición. Una tabla de transición tiene este aspecto:



La hilera de letras de la parte izquierda son emisiones. Una emisión es exactamente eso que dice la palabra, y en este caso una emisión de una onda luminosa emitida por una bombilla. El signo »)» a la derecha de una letra indica una emisión. Por ejemplo »H)» significa luz polarizada horizontalmente, emitida por un polarizador horizontal. La fila de letras en la parte superior son las admisiones. Una admisión es la recepción de una emisión. El signo »)» a la izquierda de una letra indica una admisión. Por ejemplo »)H» significa una luz horizontalmente polarizada que ha llegado a la pupila del ojo. Los ceros con una línea que los cruza, indican el «proceso cero». El proceso cero significa que en lugar de hacer el experimento hemos decidido irnos al cine. El proceso cero indica que no hay emisión, en absoluto. La letra «I» quiere decir «proceso identidad». El proceso identidad es un filtro que deja pasar todo. En otras palabras, el signo «I» nos dice qué tipo de luz polarizada pasa a través, digamos por ejemplo, de una ventana abierta: en realidad cualquier tipo de luz.

En la tabla se incluyen dos tipos de luz polarizada diagonalmente para

hacerla más completa. La D representa luz polarizada diagonalmente hacia la derecha y la D luz polarizada diagonalmente hacia la izquierda (o a la inversa).

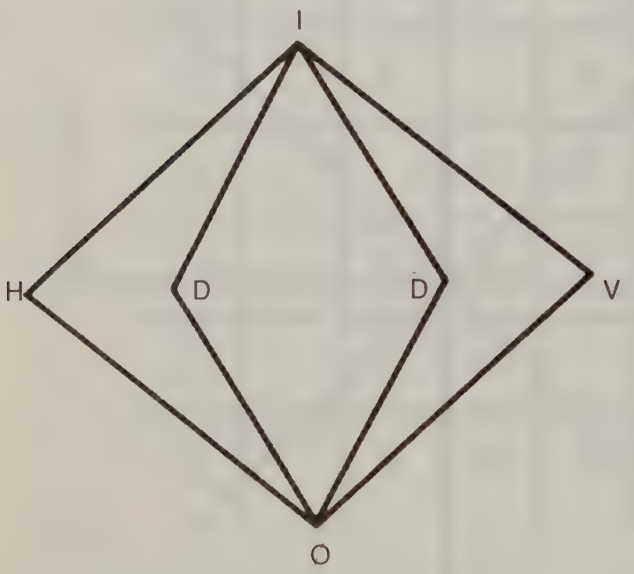


Para utilizar la tabla de transición, elegimos el tipo de emisión por el que nos interesamos y lo seguimos a través de la tabla. Por ejemplo, una emisión de luz polarizada horizontalmente, H, pasará a través de otro polarizador horizontal, así que una «A» se colocará en el cuadro de la columna de admisión polarizada. La luz polarizada horizontalmente pasa también por un polarizador diagonal inclinado a la izquierda)D, por un polarizador diagonal inclinado a la derecha)D, y por una ventana abierta «I». Un «A» ha sido colocada en cada cuadro apropiado.

Adviértase que los cuadros en los que la fila de la emisión polarizada horizontalmente intersecciona a la columna de admisión de luz polarizada verticalmente están en blanco. Esto se debe a que la luz polarizada

horizontalmente no pasa a través de un polarizador vertical. Los cuadros en blanco muestran las transiciones prohibidas. Todos los cuadros del proceso cero están en blanco porque en ellos no sucede nada, dado que no hacemos el experimento. Todos los cuadros «I» están marcados «A» porque todo tipo de luz, polarizada o no, pasa por una ventana abierta.

El tercer paso de la prueba consiste en hacer un sencillo diagrama de la información contenida en la tabla de transición. El diagrama realizado partiendo de esta tabla de transición particular tiene este aspecto:



DOBLETE

«SENCILLO»

PROCESO NULO

Este tipo de diagrama es llamado reticular. Los matemáticos los utilizan para mostrar cómo se ordenan los sucesos o elementos. Los diagramas son semejantes a los árboles genealógicos que construimos cuando investigamos los orígenes de nuestra familia. Los elementos superiores contienen a los elementos inferiores. Las líneas muestran quién está conectado con quién y a través de quién.

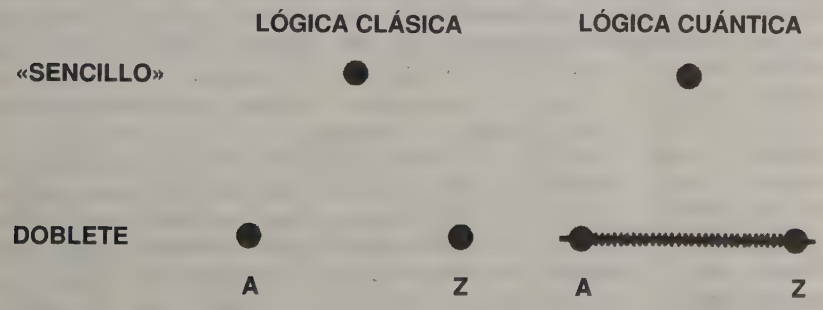
Un diagrama reticular no es exactamente un árbol genealógico, pero nos ofrece el mismo tipo de ordenamiento inclusivo. En el fondo está el proceso cero, dado que representa la falta absoluta de emisiones de todo tipo. A segundo nivel se encuentran los varios estados de polarización. Los elementos a este nivel son llamados sencillos (singlets) y se refieren a la declaración más sencilla que podemos hacer sobre la polarización de una onda de luz. «Esta luz está horizontalmente polarizada», es lo máximo que podemos decir sobre el estado de polarización, aun partiendo de

que eso no nos aclara nada más. Es una «descripción maximal pero incompleta», una limitación inherente al empleo del lenguaje.

El segundo nivel contiene los dobletes (doublet). En este caso el diagrama sólo contiene un doblete. Los dobletes comprenden el siguiente nivel de descripción, maximal pero incompleta, que podemos hacer sobre la polarización de luz en este sencillo experimento. Los diagramas que representan fenómenos más complejos pueden tener un mayor número de niveles — tripletes, cuadrupletes, etc. —. Este diagrama es el más simple de ellos pero nos demuestra, gráficamente, la naturaleza de la lógica cuántica.

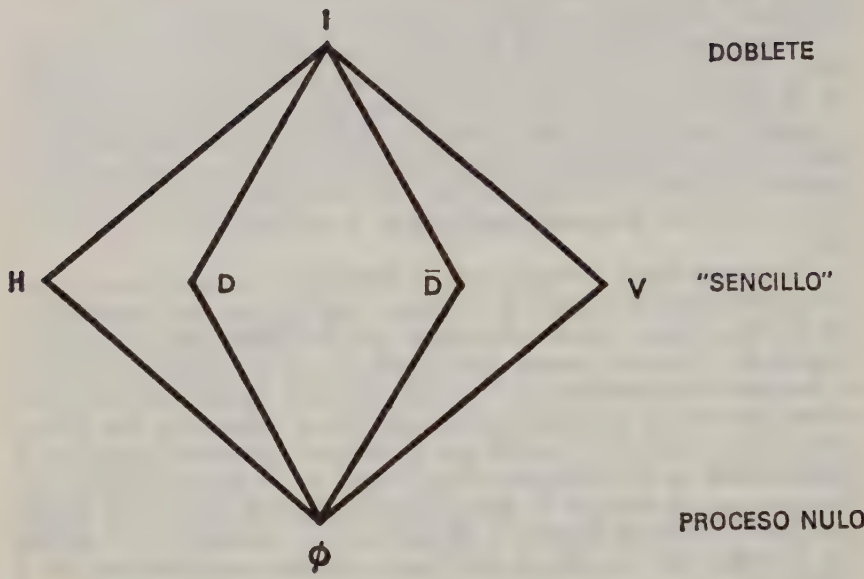
En primer lugar, obsérvese que el doblete «I», contiene *cuatro* «sencillos». Esto es característico de la lógica cuántica, pero una contradicción con la lógica clásica donde cada doblete (por definición) sólo contiene *dos* «sencillos», ni más ni menos. Los diagramas son demostraciones gráficas de los postulados cuánticos de que cuando menos siempre hay otra alternativa entre «esto» y «aquello». En este caso se representan dos alternativas («D» y «D»). Hay muchas más alternativas disponibles que no están representadas en este diagrama. Por ejemplo, la luz representada en este diagrama por el símbolo D, está diagonalmente polarizada a 45 grados, pero podía estarlo igualmente a 46 grados, a 47 grados, a 48,5 grados, etc. Y todos esos estados de polarización pueden estar incluidos en el doblete I.

Tanto en la lógica clásica como en la lógica cuántica un «sencillo» está representado por un punto. En la lógica clásica se representa a un doblete con dos puntos. En la lógica cuántica, sin embargo, un doblete se representa por una línea que une a dos puntos. Y *todos los puntos de la línea,* y no sólo los dos puntos que lo definen, están incluidos en el doblete.



Ahora regresemos a la ley distributiva: «A, B o C» iguales a «A y B, o A y C» (El verdadero propósito de hacer una tabla de transición fue construir un diagrama con objeto de utilizarlo para desmentir la ley distributiva.)

Los matemáticos utilizan estos diagramas para determinar qué elementos en ellos están conectados y de qué modo.



Por ejemplo, para ver como dos elementos del diagrama están conectados por la palabra «y», sígase las líneas que conducen desde los elementos en cuestión hacia *abajo* hasta un punto donde ambos elementos se encuentran. Si estamos interesados en «H y D», seguimos *hacia abajo* las líneas que parten de H y de D y nos encontraremos con que se unen en el punto ∅. Por consiguiente el diagrama nos dice que «H y D» iguales a ∅. Si estamos interesados en «I y H» seguimos las líneas *hacia abajo* desde el punto más alto donde ambos se encuentran. Por ejemplo si estamos interesados en «H o V», seguimos las líneas *hacia arriba* a partir de H y de V y veremos que se encuentran en I. De esta forma el diagrama nos dice que «H o V» igual a «I». Del mismo modo, para encontrar «D o I» seguimos las líneas *hacia arriba* hasta el punto común más alto, que es I. Así, pues, el diagrama nos dice que «D o I» igual a «I».

La regla es sencilla: «y» tiende *hacia abajo*; «o» *hacia arriba*. Desciéndase por el diagrama para encontrar «y», asciéndase por él para encontrar «o».

Ahora entremos en la prueba en sí. Es mucho más simple que las explicaciones preliminares. La ley distributiva dice que «A, y B o C» igual a «A y B, o A y C». Para ver si esto es cierto en la experiencia o no lo es, insertemos simplemente algunos de nuestros actuales estados de polarización en la fórmula y resolvámosla utilizando el método del diagrama. Por ejemplo, la ley distributiva dice que «La luz polarizada horizontalmente y la luz polarizada verticalmente o la luz polarizada diagonalmente»

es igual a «la luz polarizada horizontalmente y la luz polarizada verticalmente, o la luz polarizada horizontalmente y la luz polarizada diagonalmente». Utilizando las abreviaciones que ya usamos esto podría expresarse:

«H, y D o V» igual a «H y D, o H y V».

Volvamos al diagrama y examinemos, primero, la parte izquierda del postulado. Buscando la solución «D o V», seguimos las líneas del diagrama hacia arriba desde D y desde V hasta encontrar su punto común más alto («o» se busca *hacia arriba*). Vemos que se encuentran en I. Por tanto, el diagrama nos dice que «D o V» igual a «I». Substituyendo «I» por el original «D o V», tenemos a la izquierda del postulado «H y I». Siguiendo las líneas que parten de H y de I, *hacia abajo* en el diagrama («y» se busca hacia *abajo*) nos encontramos que su punto más bajo de intercesión es H. Por ello el diagrama nos dice que «H y I» igual a «H».

En resumen:

«H, y D o V» igual a «H y D, o H y V».
«H y I» igual a «H y D, o H y V».
«H» igual «H y D, o H y V».

Resolvamos la parte derecha del postulado de la misma forma. Resolviendo «H y D» seguimos las líneas del diagrama hacia abajo a partir de H y D hasta su punto común más bajo. Vemos que se encuentran en Ø. Por consiguiente, el diagrama nos dice que «H y D» igual a «Ø».

Substituyendo «Ø» por «H y D» nos quedamos con «Ø, o H y V» en la parte derecha de la declaración. Para resolver «H y V» sigamos las líneas del diagrama hacia abajo desde H y desde V hasta su punto común más bajo. Se cruzan en Ø. De esta forma, el diagrama nos dice que «H y V» igual a «Ø». Substituyendo «H y V» por «Ø», nos encontramos con «Ø o Ø» al lado derecho del postulado original. Tanto el diagrama como el sentido común nos dicen que «Ø o Ø» igual a «Ø».

En resumen:

«H» igual a «H y D, o H y V».
«H» igual a Ø, o «H y V».
«H» igual a «Ø o Ø».
«H» igual a «Ø».

¡Pero «H» *no* es igual a «Ø»! «H» es luz polarizada horizontalmente y «Ø» es la ausencia de experimento... una falta absoluta de emisión. ¡La ley distributiva no es válida!

Aquí tenemos de nuevo la prueba de Birkhoff y von Neumann. Es importante porque, pese a ser tan sencilla, pone fin a una ilusión de milenios: la ilusión de que los símbolos y la experiencia siguen las mismas leyes. Con la excepción de los símbolos matemáticos que representan las conjunciones «y» y «o», esta es la forma como los físicos lo escriben:

$$\text{«H, y D o V»} \overset{?}{=} \text{«H y D, o H y V»}.$$

$$\text{«H y I»} \overset{?}{=} \text{«Ø, o H y V»}.$$

$$\text{«H»} \overset{?}{=} \text{«Ø o Ø»}.$$

$$\text{«H»} \neq \text{«Ø»}.$$

La teoría de Finkelstein es una teoría de un proceso. La lógica cuántica es una parte de ella. De acuerdo con su teoría, la unidad básica del universo es un suceso, o un proceso. Estos acontecimientos se unen de cierto modo (transiciones permitidas) para formar redes. Las redes, a su vez, se unen para formar otras redes mayores. Más arriba en la escala de la organización están las superposiciones coherentes de diferentes redes (cosas que no son «esta red» ni tampoco «aquella red», sino entidades separadas y propias en sí mismas).

Los sucesos básicos de la teoría de Finkelstein no existen en el espacio y el tiempo. Son *anteriores* al espacio y tiempo. De acuerdo con Finkelstein, *espacio, tiempo, masa y energía son cualidades secundarias* que se derivan de los sucesos básicos del universo. De hecho, el último escrito de Finkelstein lleva por título: *Beneath time.**

Esta audaz teoría es aparta radicalmente de la física convencional y del pensamiento convencional. Las matemáticas de la teoría de Finkelstein, que tienen el nombre de topología cuántica, son realmente simples, comparadas con las complicadas matemáticas de la teoría cuántica y de la teoría de la relatividad. La topología cuántica es todavía incompleta (falta de «prueba»). Al igual que muchas teorías es más que posible que nunca sea completada. Sin embargo, a diferencia de otras teorías, contiene el potencial para cambiar de manera radical nuestro marco conceptual.

El descubrimiento de von Neumann de que nuestro proceso de pensamiento (el terreno de los símbolos) proyecta restricciones ilusorias en el mundo real, es en esencia el mismo descubrimiento que llevó a Einstein a la teoría general de la relatividad.

Einstein probó la falsedad de la universalidad de la geometría euclidiana. Hasta la formulación de la teoría general de la relatividad, la geometría euclidiana había sido aceptada, sin discusión alguna, como la estructura principal del universo. Birkhoff y von Neumann desmintieron la universalidad de la lógica clásica. Hasta ahora, la lógica clásica había sido viniendo aceptada, sin ser puesta en tela de juicio, como el reflejo natural de la naturaleza de la realidad.

En estos descubrimientos yace un poderoso conocimiento potencial. Un conocimiento de los poderes hasta ahora insospechados de la mente

* «Por debajo del tiempo.»

para dar forma a la «realidad», en vez de suceder al contrario que la «realidad» es la que conforma nuestra mente.

En este sentido la filosofía de la física se está convirtiendo en algo indistinguible de la filosofía del budismo, que es la filosofía de la iluminación.

EL FIN DE LA CIENCIA

Un aspecto vital del estado de iluminación es la experiencia de una unidad que prevalece en todo. «Esto» y «aquello» ya no son entidades separadas. Son *formas* distintas de la misma cosa. Todo es una *manifestación*. No es posible responder a la pregunta: «¿Una manifestación de *qué*?», por que este *qué* es algo que está más allá de las palabras, más allá de la forma, más allá, incluso, del espacio y del tiempo. Todo es una manifestación de lo que es. Lo que es, es. Más allá de estas palabras está la experiencia: la experiencia de aquello que es.

Las formas por medio de las cuales ese *aquél* se manifesta a sí mismo son todas y cada una de ellas perfectas. Nosotros somos manifestación de lo que es. *Todo* en absoluto es una manifestación de lo que es. Cada cosa y cada ser son exactamente y perfectamente lo que son.

Un budista tibetano del siglo XIV, Longchenpa, escribió:

> Dado que todo no es más que una aparición,
> perfecto por ser lo que es,
> sin relación alguna con lo bueno o lo malo,
> con la aceptación o el rechazo,
> uno siente deseos de soltar una carcajada.[1]

Podríamos decir: «Dios en su Cielo, que todo va bien en el mundo», excepto que de acuerdo con los puntos de vista de la iluminación el mundo no podría ser de otra forma. No está bien y no bien. Es, sencillamente lo que es. Lo que quiere decir perfectamente lo que es. No podría ser otra cosa. Es perfecto. Yo soy perfecto. Yo soy exacta y perfectamente lo que soy. Tú eres perfecto. Tú eres exacta y perfectamente lo que eres.

Si eres una persona feliz, eso es lo que tú eres perfectamente: una persona feliz. Si eres una persona desgraciada, *eso* es lo que eres perfectamente; una persona desgraciada. Si eres una persona cambiante, *eso* es lo que eres perfectamente: una persona que cambia. Lo que es, es. No hay nada que no sea lo que es. No hay ninguna cosa que no sea lo que es. Todo es lo que es. Nosotros somos parte de lo que es. En realidad nosotros somos ***lo que es.***

Si en este esquema substituimos las personas por «partículas atómicas», tendremos una buena aproximación al conocimiento de la dinámica conceptual de la física de las partículas. Existe, además, otro sentido en el cual este aspecto de unidad ha entrado en la física. Los pioneros de la física cuántica advirtieron una extraña «conexión informativa» entre los fenómenos cuánticos. Hasta no hace mucho esa rareza careció de toda importancia teórica. Se la consideró como un rasgo accidental que llegaría a ser explicado cuando la teoría se desarrollara.

En 1964, J S. Bell, un físico de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), con sede en Suiza, enfocó su interés en ese rasgo extraño de la conexión entre los fenómenos subnucleares, hasta hacer de ello el foco central de la física del futuro. El doctor Bell publicó una demostración matemática que pasó a ser conocida bajo el nombre de Teorema de Bell, que fue revisado y mejorado a lo largo de diez años de trabajo hasta quedar en su actual forma. Y esta forma actual es espectacular, para emplear una expresión suave.

El Teorema de Bell es una construcción matemática y, como tal, resulta indescifrable para los no matemáticos. Sus implicaciones, sin embargo, pueden afectar, profundamente, nuestros conceptos básicos del mundo. Algunos físicos están convencidos de que es la obra aislada más importante en toda la historia de la física. Una de las implicaciones que pueden deducirse del Teorema de Bell es que, a un nivel profundo y fundamental, las «partes separadas» del universo están conectadas de manera íntima y directa.

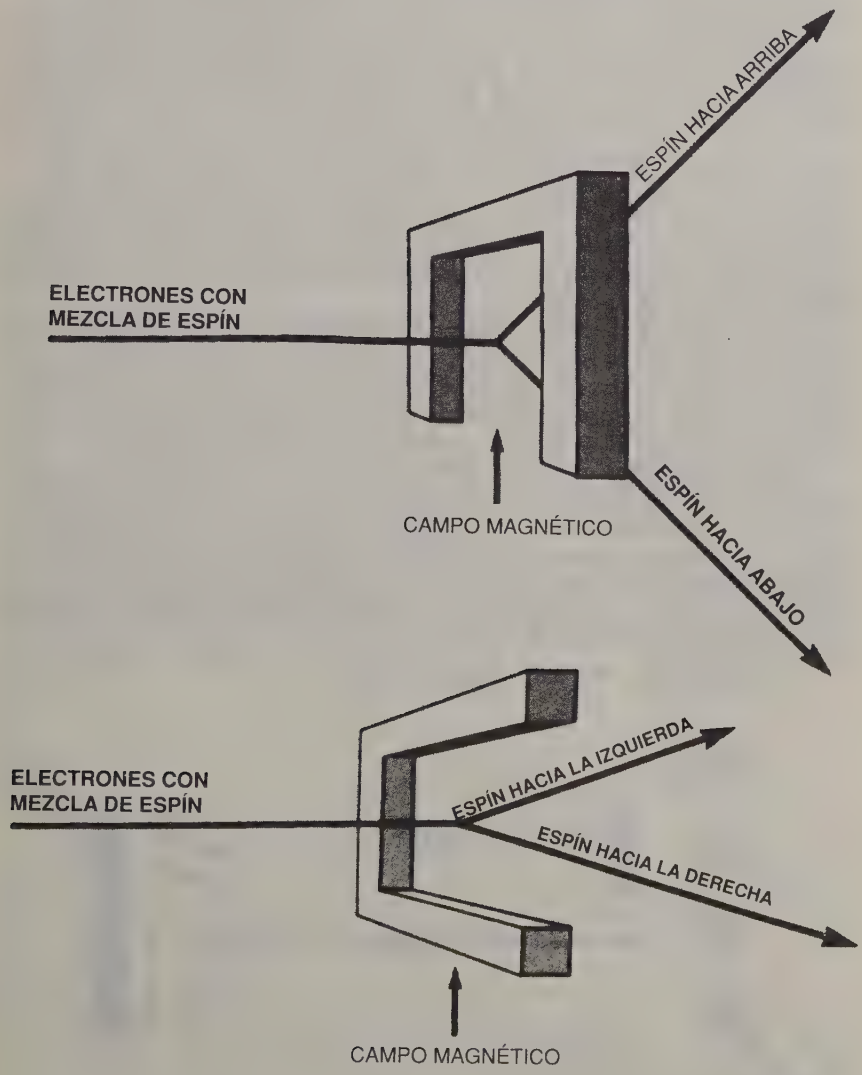
En resumen, el Teorema de Bell y la experiencia de la iluminación de la unidad son muy compatibles.

Las conexiones inexplicadas de los fenómenos cuánticos se muestran de varias formas. La primera de ellas ya ha sido objeto de estudio aquí: el experimento de la doble rendija (pág. 75). Cuando las dos aberturas de este experimento están abiertas, las ondas luminosas al pasar por ellas interfieren entre sí para formar pautas alternativas de luz y oscuridad en una pantalla. Cuando solo está abierta una de las rendijas, las ondas de luz que pasan por ellas iluminan la pantalla de forma normal. ¿Cómo puede un sencillo fotón aislado, en este experimento, saber si puede ir o no a una zona de la pantalla que tiene que quedar oscura cuando ambas aberturas están abiertas?

La multitud de fotones, de la cual forma parte ese simple fotón aislado, se distribuye de una forma determinada si sólo está abierta una de las aberturas y de otra, totalmente diferente, cuando lo están ambas. La pregunta es: Supongamos que un simple fotón aislado pasa por una de las dos rendijas, *¿cómo sabe si el otro agujero está abierto o cerrado?* De un modo u otro lo sabe, puesto que altera su comportamiento. Un modelo de interferencia se forma siempre cuando abrimos las dos aberturas y *nunca* cuando sólo está abierta una de ellas.

Existe otro experimento sobre esta aparente conexión de los fenóme-

nos cuánticos que aún causa mayor perplejidad. Supongamos que tenemos lo que los físicos llaman un sistema de dos partículas de espín cero. Esto quiere que el espín de cada una de las partículas anula al de la otra. Si una de esas partículas tiene un espín «ascendente», la otra lo tiene «des-



cendente». Si la primera partícula tiene un espín a la *izquierda,* la otra lo tendrá a la *derecha.* No importa la orientación de las partículas, sus espines serán siempre iguales y opuestos.

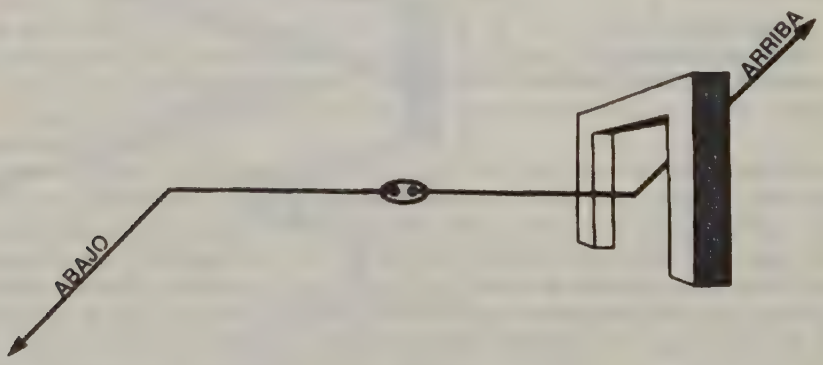
Ahora supongamos que separamos esas dos partículas de tal manera que no se afecten sus espines (por ejemplo eléctricamente). Una de las partículas escapa en una dirección y la otra en dirección opuesta.

El espín de una partícula subatómica puede ser orientado por un campo magnético. Por ejemplo, si un haz de electrones con espín orientado de manera fortuita pasa a través de un tipo especial de campo magnético (llamado aparato de Stern-Gerlach), el campo magnético divide el haz en dos haces de igual tamaño cada uno. En uno de esos haces los electrones tienen un espín hacia *arriba* y en el otro haz todos los electrones tienen espín hacia *abajo.* Si sólo un electrón pasa por ese campo magnético saldrá fuera con un espín hacia *arriba* o un espín hacia *abajo.* (Podemos diseñar el experimento de manera que las posibilidades sean del 50 %) (véase el dibujo de la página anterior).

Si reorientamos el campo magnético (cambiando su eje) podemos dar a todos los electrones un espín hacia la *derecha* o a la *izquierda* en vez de hacia *arriba* o *abajo.* Si solo un electrón pasa por el campo magnético cuando éste está orientado así, saldrá de él con un espín hacia la *derecha* o hacia la *izquierda* (las mismas posibilidades en ambos sentidos).

Ahora supongamos que, después de que hemos separado nuestro original sistema de dos partículas, enviamos a una de las partículas a través del campo magnético: esto le dará un espín hacia *arriba* o un espín hacia *abajo.* En este caso digamos que la partícula sale con un espín hacia arriba. Esto significa que sabemos que la otra partícula tiene un espín hacia *abajo.* No tenemos que medir la otra partícula puesto que sabemos que su espín es igual y opuesto a su gemela.

El experimento tiene este aspecto gráfico:

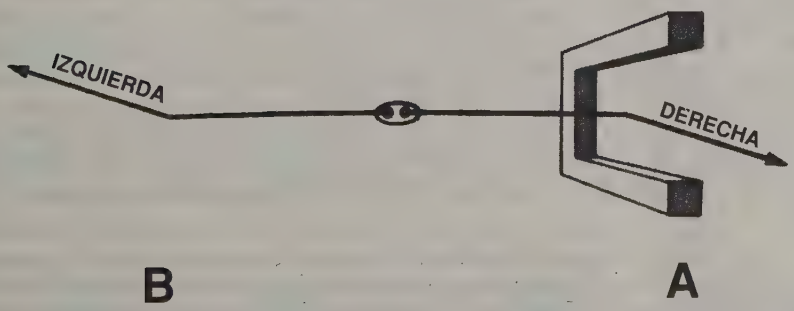


El sistema original de dos partículas con espín cero está en el centro. Una de las partículas entra en la zona A y allí pasa por el aparato de Stern-Gerlach. En este caso, ese instrumento da a la partícula un espín *hacia arriba.* Conociendo eso, sabemos, igualmente, que la otra partícula que ha entrado en la zona B tiene un espín *hacia abajo.*

Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen idearon este experimento hace más de cuarenta años. En la actualidad, esta versión del experimento de Einstein-Podolsky-Rosen (usando estados de espín) ha sido repetido por David Bohm, un físico de la Universidad de Londres. Esta versión se utiliza para ilustrar el efecto de Einstein-Podolsky-Rosen. (El escrito original trataba de posiciones y momentos.)

En 1935, Einstein, Podolsky y Rosen publicaron sus ideas sobre este experimento en una tesis titulada *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*[*2] En esa época Bohr, Heisenberg y los demás defensores de la Interpretación de Copenhague de la Mecánica Cuántica (pág. 56) afirmaban que la teoría del quanto era una teoría completa, pese a que no ofrecía una imagen del mundo separada de nuestras observaciones en él. (Y aún lo siguen afirmando). El mensaje que Einstein, Podolsky y Rosen querían hacer llegar a sus colegas era que la teoría cuántica *no* era una teoría completa, porque no describía algunos aspectos importantes de la realidad que son físicamente reales pese a que no son observados. Pero el mensaje que creyeron entender sus colegas era bastante diferente: que las partículas, en el experimento teórico de Einstein-Podolsky-Rosen, estaban conectadas de una manera que trascendía a nuestras ideas usuales sobre la causalidad.

Por ejemplo si el eje del instrumento Stern-Gerlach, en nuestro experimento hipotético, fuera cambiado para hacer que las partículas se movieran a la *derecha* o a la *izquierda,* en vez de hacia *arriba* o hacia *abajo,* el experimento tendría este aspecto:



* «¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?»

La partícula en la zona A tendría un espín hacia la *derecha* en vez de hacia *arriba*. Esto significaría que la partícula de la zona B tendría espín hacia la *izquierda* en vez de hacia *abajo*. Su espín sería siempre igual y opuesto a la de su partícula gemela.

Supongamos que cambiamos el eje del instrumento de Stern-Gerlach mientras las partículas se desplazan. De un modo u otro la partícula que viaja en la zona B «sabe» que su gemela en el área A está girando hacia la *derecha* en vez de hacerlo hacia *arriba* y cambia igualmente su espín hacia la *izquierda* en vez de seguir con espín hacia *abajo*. En otras palabras: *lo que hacemos en la zona A (cambiar el eje del campo magnético) afecta a lo que ocurre en la zona B*. Este extraño fenómeno es conocido como el Efecto EPR (Einstein-Podolsky-Rosen).

El experimento teórico de Einstein, Podolsky y Rosen es la Caja de Pandora de la física moderna. De manera accidental ilustra una inexplicable conexión entre partículas situadas en dos lugares distintos. La partícula en la zona B parece saber, de forma *instantánea,* el tipo de rotación que tiene la partícula en la zona A.* Esta relación o conexión, permite al experimentador que está en un lugar (zona A) modificar el estado de un sistema situado en otro lugar (zona B).

«Resulta un tanto incómodo», observó Erwin Schrödinger, al referirse al fenómeno,

> «que la teoría cuántica permita que un sistema sea dirigido o conducido a uno u otro tipo de estado, a voluntad del que realiza el experimento, aun sin tener acceso a él».[3]

De inmediato, los físicos se dieron cuenta que esta situación especial tan peculiar crea una cuestión crítica: «¿Cómo pueden dos "algos" comunicarse tan rápidamente?»

De acuerdo con las ideas corrientes en física, la información es llevada de un lugar a otro por una señal. Sin un portador no hay comunicación. Por ejemplo, la forma más corriente de comunicación es hablar. La información que transmitimos hablando es transportada (en una conversación cara a cara) por las ondas sonoras, que tienen una velocidad limitada (unos 1.200 kilómetros a la hora). Por consiguiente, el tiempo que me tarde en llegar una información que me está siendo transmitida por mi interlocutor depende de la distancia a que éste se halle de mí. La señal de comunicación más rápida es la onda electromagnética, que tiene la misma ve-

* Vistos por un sistema coordenado particular. Debemos proceder con mucho cuidado al emplear palabras como «instantáneo». La teoría especial de la relatividad de Einstein, muestra que si bien un acontecimiento puede parecer que está sucediendo de manera simultánea, o que sucedió antes o que sucederá después que otro acontecimiento, eso depende del marco de referencia desde el que se realiza la observación. Hablando con precisión esta clase de comunicación se llama «espacial» (véase la página siguiente». Las transferencias «espaciales» no siempre parecen instantáneas desde marcos de referencia especiales.

locidad que una onda luminosa o una onda de radio, todas ellas viajan a unos trescientos mil kilómetros por segundo. Casi todos los físicos aceptan que *nada en el universo puede desplazarse a una velocidad mayor que la de la luz*. La extraordinaria velocidad de la luz hace que la comunicación mediante las señales luminosas parezca instantánea. Yo creo ver como alguien mueve la cabeza en el momento exacto en que lo hace. Pero la verdad es que la comunicación mediante señales luminosas no es instantánea. El tiempo que necesite mi información por medio de señales luminosas en llegar a su destinatario depende de la distancia que nos separe. En la mayoría de los casos el tiempo de desplazamiento es tan corto que difícilmente puede ser medido. Sin embargo una señal de radio precisa varios segundos en llegar desde la tierra a la luna y regreso.

Ahora supongamos que la zona A y la zona B están muy alejadas. Una señal luminosa tardaría cierta cantidad de tiempo en desplazarse desde la zona A a la zona B. Si ambas zonas están tan separadas entre sí que no hay tiempo suficiente para que una señal luminosa establezca conexión entre un suceso que está ocurriendo (en A con un suceso que está ocurriendo en B), no hay forma — de acuerdo con las ideas usuales de la física — de que el suceso en B conozca el suceso que ocurre en la zona A. Los físicos llaman a esto una separación espacial. (Un suceso está separado con una separación «espacial» de otro si no hay suficiente tiempo para que una señal luminosa los conecte entre sí). La comunicación entre objetos alejados uno de otros por una separación «espacial» es un desafío a uno de los supuestos más aceptados de la física. Pese a que están separados espacialmente, el estado de la partícula en la zona B depende de lo que el experimentador en la zona A decida observar (del modo como ordene el campo magnético).

En otras palabras, el efecto Einstein-Podolsky-Rosen muestra que la información puede ser comunicada a velocidades *superlumínicas* (más rápidas que la de la luz), contrariamente a lo que se acepta en la física. Si las dos partículas en el experimento teórico de Einstein-Podolsky-Rosen están conectadas — como sea — por una señal, esta señal se desplaza a velocidad superior a la de la luz. Es posible que Einstein, Podolsky y Rosen hayan creado el primer ejemplo científico de conexión superlumínica.

Pero el propio Einstein negaba esta conclusión. Argüía que no es posible que la posición que elijamos para un instrumento de medición situado en un determinado lugar pueda afectar lo que sucede en cualquier otra parte. En su autobiografía, escrita once años después de que se publicara la obra conjunta de Einstein, Podolsky y Rosen, escribió:

> «... una suposición que creo debemos mantener con firmeza: la situación real de hecho existente en el sistema S_2 (la partícula en la zona B) es independiente de lo que hagamos con el sistema S_1 (la partícula en la zona A), que está espacialmente separado del anterior.»[4]

En realidad esta opinión es el principio de causas locales, que dice que lo que sucede en una zona no depende de variables sujetas al control de un experimentador situado en una zona distante, separada espacialmente. El principio de las causas locales es de sentido común. Los resultados de un experimento en un lugar distante y separado espacialmente de nosotros no deberían depender de lo que nosotros decidamos hacer o dejar de hacer aquí. (Excepto en casos como el de una madre que tiene un sobresalto de alarma en el mismo instante que su hija sufre un accidente de automóvil a muchos kilómetros de distancia — y otros semejantes —, el mundo de lo macroscópico parece estar hecho de fenómenos locales.)

Dado que los fenómenos son locales por naturaleza, expuso Einstein, la teoría cuántica tiene un fallo serio. De acuerdo con la teoría cuántica, cambiando el instrumento de medición en la zona A se cambia la función de onda que describe a la partícula en la zona B, pero (de acuerdo con Einstein) no cambia «la situación real de hecho existente en el sistema S_2 (que) es independiente de lo que se haga con el sistema S_1...»

Por lo tanto, la misma «situación de hecho» en la zona B tiene dos funciones de onda, una por cada posición del instrumento de medida en la zona A. Esto es un fallo, puesto que es «imposible que dos tipos distintos de función de onda puedan estar coordinados con la misma situación de hecho de S_2».[5]

Pero hay otro modo de contemplar la situación: dado que la situación real de hecho en la zona B es independiente de lo que se haga en la zona A, tiene que existir, *simultáneamente* en la zona B un definido espín hacia *arriba* o hacia *abajo* y un espín definido hacia la *derecha* o hacia la *izquierda,* para que se produzcan todos los resultados que podemos conseguir mediante el cambio de orientación del aparato de Stern-Gerlach en el área A, vertical u horizontalmente. La teoría cuántica no está en condiciones de describir un estado tal en el área B y, por lo tanto, es una teoría incompleta.*

* El argumento EPR sobre lo incompleto de la teoría cuántica descansa sólidamente en el supuesto de que la real situación de hecho en una región no puede depender de lo que un exprimentador pueda hacer en una región muy distante (el principio de las causas locales).

Einstein, Podolsky y Rosen señalaron que podríamos haber elegido colocar el eje magnético situado en el área A, bien en posición vertical, bien en posición horizontal y que, en cada caso, hubiéramos observado un resultado definido — bien hacia *arriba* o hacia *abajo* en caso de elegir la verticalidad, o a *la derecha* o a *la izquierda,* de elegir la posición horizontal. Afirman, también, que lo que hacemos (elegir entre observar o medir) en la zona A no puede afectar la real situación de hecho en la zona B; partiendo de ahí, concluyen que tiene que existir *simultáneamente* en la zona B un determinado espín, *arriba* o *abajo* y también un definido espín a la *derecha* o a la *izquierda,* que puedan responder a todos los posibles resultados que podemos obtener mediante la orientación del eje magnético de la zona A, de un modo o de otro.

La teoría cuántica no es capaz de describir un estado tal y, por lo tanto, Einstein, Podolsky y Rosen llegaron a la conclusión que la descripción que ofrece la teoría cuántica no es completa; la descripción del quanto no puede representar

Sin embargo, Einstein termina sus conclusiones con un apartado increíble:

> «Sólo puede uno escapar a esta conclusión (que la teoría cuántica es incompleta) presumiendo que las mediciones de S_1 (telepáticamente) cambian la situación real de S_2 o negando situaciones de independencia real, como tales, en cosas que se hallan separadas espacialmente entre sí. A mí, ambas alternativas me parecen enteramente inaceptables.»[6]

Pero si esas alternativas resultaban inaceptables para Einstein, en la actualidad están siendo tomadas en consideración por otros físicos. Pocos físicos creen en la telepatía, pero algunos creen que no existen «situaciones realmente independientes», a un nivel profundo y fundamental, entre cosas que interaccionaron en el pasado pero que se encuentran espacialmente separadas entre sí, o que el cambiar el instrumento de medida en la zona A *cambia* la «situación real de hecho» en la zona B.

Y esto nos conduce al Teorema de Bell.

El Teorema de Bell es una prueba matemática. Lo que «prueba» es que si las predicciones estadísticas de la teoría cuántica son correctas, en tal caso algunas de las ideas (basadas en el sentido común) que tenemos sobre el mundo son un profundo error.

El Teorema de Bell no demuestra claramente de qué manera nuestras ideas sobre el mundo basadas en el sentido común son inadecuadas. Hay numerosas posibilidades. Cada una de ellas tiene un campeón entre el reducido número de físicos que están familiarizados con el Teorema de Bell. No importa cual de las implicaciones del Teorema de Bell sea nuestra preferida, de un modo u otro, ya de por sí, el Teorema de Bell nos lleva a la ineludible conclusión de que si las predicciones estadísticas de la teoría cuántica son acertadas, en tal caso nuestras ideas sobre el mundo, basadas en el sentido común, son profundamente deficientes.

Esta es una conclusión realmente dramática, porque *las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica son siempre acertadas*. La mecánica cuántica es *la* teoría. Lo ha explicado todo, desde las partículas subatómicas a los transistores y a la energía estelar. Nunca ha fallado. No tiene rival que pueda competir con ella.

En la década de 1920-1930 los físicos cuánticos se dieron cuenta de que nuestras ideas basadas en lo que llamamos sentido común resultaban inadecuadas para describir los fenómenos subatómicos. ¡El Teorema de Bell prueba que lo son también para los sucesos del mundo macroscópico, los sucesos de nuestro mundo cotidiano!

Como escribió Henry Stapp:

---

determinada información sobre el sistema en la zona B (la existencia simultánea de distintos estados rotativos) que es necesaria para describir completamente la situación que allí se da.

«Lo importante del Teorema de Bell es que llevó el dilema planteado por los fenómenos cuánticos, con toda claridad, al terreno de los fenómenos macroscópicos... muestra que nuestras ideas cotidianas sobre el mundo son profundamente deficientes, por una causa u otra, incluso a nivel de lo macroscópico».[7]

El Teorema de Bell ha sido reformulado de distintos modos desde que Bell publicó la versión original en 1964. No importa como se formule, siempre proyecta los aspectos «irracionales» de los fenómenos subatómicos en el dominio de lo macroscópico. Dice que no son solamente los sucesos en el campo de lo muy pequeño los que se comportan de un modo sumamente diferente de nuestros puntos de vista sobre el mundo basados en el sentido común, sino que ocurre lo mismo con los sucesos en el mundo de las autopistas y los coches deportivos. También aquí se escapan al punto de vista del sentido común. Esta declaración increíble no puede ser rechazada como una fantasía, debido a que está basada en la tremenda y comprobada exactitud de la propia teoría cuántica.

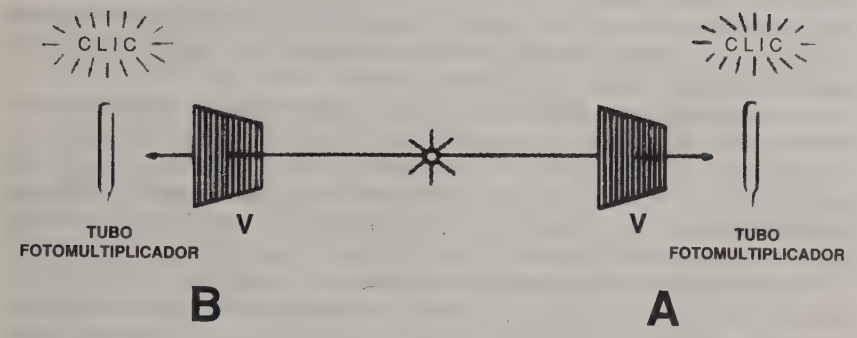
El Teorema de Bell se basa en la correlación entre partículas aparejadas, semejantes a la pareja de partículas del experimento teórico de Einstein-Podolsky-Rosen. Imaginemos, por ejemplo, un gas que emite luz cuando es excitado eléctricamente (pensemos en un anuncio de neón). Los átomos del gas al ser excitados emiten fotones en parejas. Los fotones en cada uno de estos pares escapan en direcciones opuestas. Excepto en la diferencia de dirección de desplazamiento, los fotones en cada par son completamente iguales, gemelos. Si uno de ellos está polarizado verticalmente, el otro también lo está. Si uno de los fotones del par está polarizado horizontalmente, lo mismo le sucede al otro; pero independientemente del ángulo de polarización, ambos fotones en cada pareja están polarizados en el mismo plano.

Por consiguiente, si conocemos el estado de polarización de uno de esos fotones, automáticamente conoceremos el estado de polarización del otro. La situación es semejante a la del experimento teórico de Einstein-Podolsky-Rosen, con la excepción de que ahora estamos discutiendo estados de polarización en vez de estados de espín.

Podemos comprobar que ambos fotones, en cada par, están polarizados en el mismo plano enviándolos a través de polarizadores. A continuación ofrecemos un esquema gráfico de este sencillo procedimiento (conceptual).

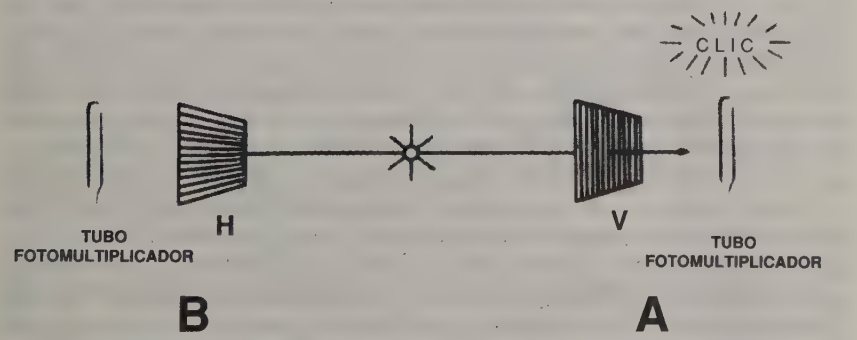
Una fuente de luz en el centro del dibujo emite una pareja de fotones. A ambos lados de la fuente de luz se han colocado sendos polarizadores en la trayectoria de los fotones emitidos. Detrás de los polarizadores, hay tubos fotomultiplicadores que emiten un chasquido (o un equivalente electrónico inaudible) cada vez que detectan un fotón.

Cada vez que el tubo fotomultiplicador situado en la zona A emite una señal, el tubo situado en la zona B hace lo mismo. Esto se debe a que ambos fotones, en cada pareja de fotones emitida, siempre están polariza-



dos en el mismo plano que los polarizadores y los dos polarizadores en nuestro experimento están alineados en la misma dirección (en este caso verticalmente). Aquí no se trata de aplicar ninguna teoría, sino simplemente de contar las señales de los tubos. Sabemos, y podemos comprobarlo, que cuando dos polarizadores están alineados en la misma dirección, los tubos fotomultiplicadores situados tras ellos dan exactamente el mismo número de señales sónicas o electrónicas. Las señales en la zona A están correlacionadas con las de la zona B. En este caso esa correlación es *uno*. Cada vez que uno de los tubos suena, el otro lo hace igualmente.

Ahora supongamos que orientamos uno de los polarizadores a 90 grados en relación con el otro. A continuación ofrecemos una representación gráfica de este dispositivo.



Uno de los polarizadores sigue alineado verticalmente, pero el otro polarizador ha sido colocado horizontalmente. Las ondas luminosas que pasan por un polarizador vertical son detenidas por un polarizador horizontal, y viceversa. Por consiguiente, cuando los polarizadores están ali-

neados formando ángulo recto entre sí, una señal en la zona A *nunca* vendrá acompañada de una señal en la zona B. En esta ocasión la correlación es *cero*. Cada vez que uno de los tubos produzca una señal, el otro tubo permanecerá *siempre* en silencio y sin actuar.

Existen igualmente correlaciones entre las señales en la zona A y las señales en la zona B para cada posible combinación de los polarizadores situados entre estos dos extremos. Esas correlaciones estadísticas pueden ser anticipadas por la teoría cuántica. Para cada situación respectiva dada de los polarizadores, se producirá un cierto número de señales en una zona que será acompañada por otro cierto número de señales en la otra zona.

Bell descubrió que cualquiera que fueran las posiciones de los polarizadores entre sí, las señales en la zona A tenían una correlación demasiado fuerte con el número de señales en la zona B como para que eso fuera obra del azar. Tenía que existir una relación: ambas zonas tenían que estar conectadas de un modo u otro. Pero, por otra parte, si existía esa relación, esa conexión, ¡entonces el principio de las causas locales (que dice que lo que ocurre en una zona no depende de las variables sujetas al control de un experimentador en una zona situada a distancia espacial) es una ilusión! En resumen, el Teorema de Bell demostraba que el principio de las causas locales, por razonable que nos parezca, es matemáticamente incompatible con la aceptación de que las predicciones estadísticas de la teoría cuántica son válidas (al menos válidas en este experimento y en el experimento de Einstein-Podolsky-Rosen).*

* La argumentación empleada por Einstein, Podolsky y Rosen para demostrar lo incompleto de la teoría cuántica se basaba en la aceptación del principio de las causas locales. La validez de este principio les parecía plausible a la mayor parte de los físicos, porque son mayoría los que dudan de que la real situación de hecho en una de las zonas del experimento EPR pudiera ser influida por las acciones de un observador situado a gran distancia. Las dudas surgieron del hecho de que el estado quántico, compuesto de un número igual de partes *derechas* y partes *izquierdas* es exactamente equivalente al estado cuántico compuesto del mismo número de partes hacia *arriba* y partes hacia *abajo*. Esas dos combinaciones resultaban indistinguibles experimentalmente. De ese modo las acciones de un observador a gran distancia no podían, por sí mismas, producir efectos observables aquí. Por consiguiente, no estaba claro que la real situación aquí hubiese cambiado.

La argumentación Einstein-Podolsky-Rosen (y el principio de las causas locales) fue demolido por Bell en 1964. Bell demostró que algunas de las varias hipótesis que están implícitas en la argumentación de Einstein-Podolsky-Rosen significan que lo que ocurre experimentalmente en la zona B *tiene que depender* de lo que el experimentador haga en la zona A, o viceversa. Las hipótesis son: (1) que el observador, en cada zona, puede orientar el campo magnético de su zona en cada una de las dos direcciones alternativas; (2) que un resultado experimental particular (aunque generalmente desconocido) puede ocurrir en cada una de las cuatro situaciones alternativas experimentales, y (3) que las predicciones estadísticas de la teoría cuántica son válidas (digamos con un 3 % de margen) en cada una de las cuatro alternativas. El argumento de Bell demostró mediante la simple aritmética, que estas tres hipótesis implican que los resultados experimentales en una de las dos zonas dependerá de lo que el observador decida observar en la otra zona (es decir, de cómo oriente el campo magnético en su instrumento Stern-Gerlach). Esta conclusión contradice la hipótesis localista del argumento de Einstein-Podolsky-Rosen.

Las correlaciones utilizadas por Bell eran predicciones de la teoría cuántica calculadas, pero no comprobadas. En 1964, este experimento continuaba siendo una construcción hipotética. En 1972, en el Laboratorio de Lawrence Berkeley, John Clauser y Stuart Freedman realizaron prácticamente el experimento para confirmar o rechazar esas predicciones.[8] Y encontraron que las predicciones estadísticas en las que Bell basaba su teorema eran correctas.

El Teorema de Bell no sólo sugiere que el mundo es muy distinto de lo que parece, sino que lo *exige* así. Esto es algo que no puede ser puesto en duda. Lo que sucede es muy emocionante. Los físicos han *probado* racionalmente que nuestras ideas racionales sobre el mundo en que vivimos son profundamente deficientes.

Si bien el experimento de Clauser-Freedman confirma que las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica sobre las cuales Bell construyó su teorema eran correctas, no probaba que esas fuertes correlaciones fuesen el resultado de una comunicación superlumínica. (La posición de los polarizadores frente a los tubos fotomultiplicadores en el experimento de Clauser-Freedman se mantiene fija durante un tiempo que resulta largo si se le compara con el tiempo de desplazamiento de la pareja de fotones. Los fotones componentes de una pareja están separados espacialmente una vez que están desplazándose, pero los procesos de medición que los detectarán en la zona A y en la zona B no están espacialmente separados.) Como veremos posteriormente, la comunicación superlumínica no es la única explicación posible del experimento de Clauser-Freedman. En realidad, en 1972, la explicación basada en la comunicación superlumínica sufrió un gran golpe. Era imposible.

De acuerdo con la relatividad, la «comunicación más-rápida-que-la-luz», es una insensatez, porque la comunicación requiere una señal que vaya de un lugar a otro y las señales no pueden trasladarse de un lugar a otro a una velocidad mayor que la de la luz.* En resumen, las partículas en el experimento teórico de EPR y en el práctico realizado por Clauser-Freedman parecen estar conectadas de algún modo, pese a que, de acuerdo con las leyes de la física, *no* pueden estarlo (si realmente están espacialmente separadas) porque la única manera en que podrían comunicarse sería mediante el envío y recepción de señales.

En 1975, un físico llamado Jack Sarfatti hizo una propuesta tan «obvia» que nadie antes había pensado en ella. Lo que Sarfatti propuso fue que si lo que es es (los resultados del experimento de Clauser-Freedman),

*** La relatividad permite la existencia hipotética de partículas, llamadas «taquiones», que adquieren existencia trasladándose a velocidad mayor que la luz. En el formalismo de la teoría especial de la relatividad, los taquiones tienen una masa de reposo imaginaria. Desgraciadamente, nadie sabe lo que, en términos físicos, significa «masa de reposo imaginaria», ni qué fuerzas interactuantes podrían existir entre las partículas que tienen una masa de reposo real, y de las cuales todos estamos hechos.**

en ese caso las leyes de la física tenían que ser incorrectas o inadecuadas. Concretamente, Sarfatti dijo que las leyes de la física eran inadecuadas para describir aquel fenómeno. Este fenómeno, según Sarfatti, era que las partículas en el experimento teórico de EPR y en el práctico de Clauser-Freedman *estaban* separadas espacialmente y *estaban* conectadas, ¡pero *no estaban conectadas por señales!* Estaban conectadas íntima e inmediatamente de una forma que trascendía al espacio y al tiempo. Sarfatti llamó a su teoría de la transferencia superlumínica de negentropía (información) sin señales. (Negentropía es otro término para designar «orden») (pág. 222).

En 1905, Einstein transformó el misterio de la constancia de la velocidad de la luz en el postulado de la constancia de la velocidad de la luz y con ello consiguió una rica cosecha de resultados teóricos (entre ellos la teoría especial de la relatividad) (pág. 143). Sarfatti, en 1975, transformó el rompecabezas de la comunicación superlumínica en el postulado de la comunicación superlumínica y también él recolectó una rica cosecha de resultados teóricos, como veremos seguidamente.

De acuerdo con la teoría de Sarfatti, cada uno de los saltos del quanto es una transferencia espacial superlumínica de negentropía. No hay transporte de energía en esa transferencia. Nada se desplaza de la zona A a la zona B. Y, sin embargo, hay un cambio instantáneo en la cualidad (en la estructura coherente) de la energía en ambas zonas, A y B.*

El concepto de comunicación más-rápida-que-la-luz entre dos sucesos que no pueden quedar conectados por una señal (ésta es la definición de «espacial»), es una desviación tan radical que la física corriente como lo fue la teoría especial de la relatividad de Einstein de la física aceptada en 1905. Sin embargo, tiene cierta consistencia lógica con el pensamiento clásico de la física. En realidad puede derivarse de la indivisibilidad de acción del quanto de Planck, que a su vez es el elemento básico de la teoría cuántica.

La auténtica indivisibilidad de acción del quanto de Planck (pág. 63) implica que los saltos del quanto entre diferentes estados en un sistema cuántico tienen que ser discretos. Si efectuamos una medición en un sistema observado que se propaga en aislamiento entre una región de preparación y una región de medición (pág. 84), una de las posibilidades en la función de onda que representa el sistema observado se realiza y las otras posibilidades de la función de onda se desvanecen (pág. 88). El sistema observado se observará, entonces, como en un estado u otro. En otras palabras: un sistema de quanto no pasa a través de una serie continua de estados intermedios en ninguno de los cambios observables.

Puesto que en general un estado es un modelo de información extendido por el espacio, se deduce que un cambio discreto de estado implica una variación instantánea del modelo de información que define la función de onda. En otras palabras: si el único modo de comunicarse fuera mediante señales limitadas a la velocidad de la luz, como máximo, la transición

* La teoría de Sarfatti no es la teoría del taquión. Los taquiones transportan energía y momento a través del espacio.

entre estados estacionarios no podría ser discreta (es decir, discontinua). Tendría que haber una serie continua de estados intermedios correspondientes a los diferentes estadios en la señal de propagación. Por consiguiente, la indivisibilidad de la acción del quanto, de Planck, conduce, con lógica consistencia a la idea de mensajes sin señal.

Independientemente, Stapp llegó a la misma conclusión. En su escrito *Are Superluminal Connections Necessary?,** llegó a la conclusión de que podrían serlo:

> «Los fenómenos del quanto ofrecen pruebas *prima facie* de que la información circula de maneras que no están conformes con las ideas clásicas. Por esa razón la idea de que esa información sea transferida superlumínicamente, no es, a priori, irrazonable... Todo lo que conocemos sobre la naturaleza está acorde con la idea de que los procesos fundamentales de la naturaleza están situados fuera del espacio-tiempo, aunque generan sucesos que pueden estar situados, localizados, en el espacio-tiempo. El teorema de este escrito apoya esa forma de ver la naturaleza, al demostrar que la transferencia superlumínica de información es necesaria, salvo si se consideran ciertas alternativas... que parecen menos razonables. Desde luego, la opinión de Bohr parece conducir al rechazo de las otras posibilidades y, de aquí podemos deducir que la transferencia superlumínica de información es necesaria.»[9]

Alan Aspect, físico del Instituto de Óptica de la Universidad de París, en Orsay, Francia, está preparando un experimento que, por coincidencia, será una prueba crucial de la teoría de Sarfatti sobre la comunicación más-rápida-que-la-luz sin señales. En efecto: Aspect quiere realizar el experimento de Clauser-Freedman, pero la diferencia más importante va a ser que el estado de polarización de los instrumentos de medición se cambiará mientras el par de fotones se esté desplazando. Cambiando las posiciones de los polarizadores mientras la pareja de fotones está volando, resulta de todo punto imposible para uno de los fotones del par conocer, por medio de señales ordinarias que se propagan dentro del espacio-tiempo, lo que le ocurre a su compañero. El experimento de Aspect servirá para comprobar la conclusión teórica de Bohm (que éste expresó en términos de estado de espín) de que, de algún modo, la partícula en la zona B conocía, *en el mismo momento en que aquello estaba sucediendo,* que el estado de su compañero situado en la zona A, del que estaba separado espacialmente, había cambiado y en consecuencia, y de acuerdo con ella, también la partícula en B cambiaba.

En relación con la teoría de Sarfatti, lo que podrá demostrar el experimento de Aspect, en el mejor de los casos es la existencia de un canal superlumínico. Esto se debe a que el experimento de Aspect, tal y como

* ¿Son necesarias las conexiones superlumínicas?

está diseñado, utiliza sólo la complementariedad de la partícula en su proceso de determinación de resultados. En vista de ello, Sarfatti propone la sustitución de los fotomultiplicadores de Aspect, que son detectores de partículas, por los sistemas de doble-rendija que tienen «microscopios de Heisenberg» en cada rendija.*

Un sistema de doble-rendija es un detector de ondas (pág. 75). Un microscopio de Heisenberg es un detector de partículas (pág. 121). Si se coloca un microscopio de Heisenberg en cada rendija en un experimento de doble-rendija podremos determinar por cuál de ellas ha pasado un fotón. La utilización del sistema de doble-rendija conjuntamente con los microscopios de Heisenberg (detectores de partículas) en cada una de las rendijas nos ofrece la oportunidad de elegir entre utilizar un modo para detectar ondas y otro para detectar partículas. Cuando encendemos los microscopios de Heisenberg, tenemos un sistema de detección de partículas. Cuando los desconectamos disponemos de un sistema de detección de ondas. Es, precisamente, esta posibilidad de elegir entre dos contextos experimentales mutuamente incompatibles (ondas y partículas), lo que nos permitirá codificar un mensaje en el canal superlumínico.

Si conectamos los microscopios de Heisenberg y uno de ellos detecta un fotón que pasa por una de las rendijas en un experimento de doble-rendija, se destruye el modelo de interferencia (para aquel fotón). Si nuestros detectores fueran absolutamente eficaces, es decir, sin fallo alguno, detectarían cada fotón aislado que pasara por una rendija u otra y no habría modelos de interferencia en absoluto. Pero por lo general no hay detectores tan eficaces. Y lo que es más: esos detectores no serían utilizables para nuestro propósito como detectores del estado de ser de una partícula.

Este tipo de detectores pueden detectar fotones con un grado de probabilidad variable, pero controlable, y así lo hacen. En la práctica, sin embargo, si colocásemos un hipotético microscopio de Heisenberg (detector de partículas) que expresara el presente estado de ser en cada una de las rendijas, no se destruiría el modelo de interferencia en su totalidad, sino que lo alteraría en grados variables. El grado de alteración estaría sujeto al control directo del experimentador. En otras palabras, utilizando esos detectores de partículas podríamos «modular» conscientemente el modelo de interferencia en cada terminal de un sistema dual de doble-rendija como el propuesto por Sarfatti.

La teoría de Sarfatti, basada en el Teorema de Bell y en el efecto EPR, declara que el modelo de interferencia que vemos en uno de los terminales de uno de esos sistemas de doble-rendija está inseparablemente ligado con el modelo de interferencia que vemos en el otro terminal de un modo que está por encima del espacio-tiempo. Por consiguiente, una modulación

* El concepto «microscopios de Heisenberg» se refiere, por lo general, al famoso experimento teórico de Heisenberg (pág. 121) y en particular a instrumentos del tipo descrito por John A. Wheeler en su reciente publicación *The Past and the Delayed-Choice Double-Slit Experiment* (Universidad de Tejas).

del modelo de interferencia en uno de los terminales del sistema causaría una modulación semejante en el otro terminal del sistema, pese a que no hay ninguna señal transportadora de energía-momento que enlace los dos procesos. Eso es lo que Sarfatti llama un «sincronismo de fase no-local en un intervalo espacial».* **

Si el experimento de Aspect refleja las mismas sólidas correlaciones previstas por la mecánica cuántica y confirmadas por el experimento de Clauser-Freedman, eso significará una sentencia de muerte para la teoría de Sarfatti de la transferencia superlumínica de información sin señal. (Esto es ciencia en su mayor grado. La posibilidad de someter a prueba a las teorías es lo que separa a la ciencia de la metafísica.)

Por el contrario, si el experimento de Aspect confirma la persistencia de esa poderosa correlación entre los dos fotones componentes de un par de fotones prevista por la teoría cuántica y confirmada por el experimento de Clauser-Freedman, incluso cuando la posición de la polarización de los instrumentos de medición esté alterada mientras los fotones estén desplazándose, en ese caso la teoría de Sarfatti de la comunicación más-rápida-que-la-luz sin señales pasará a ser uno de los principales candidatos para explicar el fenómeno. Si la teoría de Sarfatti de la comunicación superlumínica sin señales prueba su validez para correlacionar experiencias correctamente, se habrá producido una importantísima revolución tanto en el pensamiento occidental como en la ciencia física.

En otras palabras, el experimento de Aspect puede llegar a convertirse en el experimento de Michelson-Morley que nos introducirá de lleno en la era post-einsteiniana.

Henry Stapp, en una obra patrocinada por la administración norteamericana para la investigación y el desarrollo de la energía, escribió en 1975:

* La teoría de la transferencia superlumínica de información podría ser una analogía física del sincronismo de Jung.

** De acuerdo con la teoría de Sarfatti la función de onda del par de fotones está a «más alto nivel de realidad» que la función de onda de cada uno de los fotones por separado. El grado de coherencia (negentropía, orden) del par de fotones al más alto nivel de realidad es, por lo general, mayor que la suma de las negentropías separadas de los fotones individuales que componen el par en el «más bajo nivel de realidad». En otras palabras: el todo es mayor que la suma de las partes. Esto es lo que Sarfatti llama «la desigualdad termodinámica del orden emergente».

Cuando partes separadas situadas a un nivel de realidad interactúan unas sobre otras, mediante el intercambio de señales, o sea de fuerzas, sus funciones de onda separadas se correlacionarán en el próximo nivel superior de realidad. De este modo no seguirán siendo realmente «partes separadas», apariencias en el más bajo nivel de lo opuesto.

A nuestro nivel de realidad, la función de onda asociada al par de fotones «transmite órdenes desde más allá del espacio y el tiempo». Todo paso hacia un nuevo nivel de realidad es un paso hacia un nuevo orden —ésta es la definición de un nivel de realidad—. En este sentido el efecto EPR es el principio básico estructural de nuestra realidad jerárquica de múltiples niveles, es decir que las funciones de onda de sucesos que están «separados» en un nivel de realidad están correlacionadas en el siguiente nivel; los «sucesos separados» a ese nivel se correlacionan en el siguiente nivel, etc., etc.

«El Teorema de Bell es el descubrimiento más profundo de la ciencia.»[10]

El Teorema de Bell demuestra que, o bien las predicciones estadísticas de la teoría cuántica son falsas o bien lo es el principio de las causas. No dice cuál de los dos es el falso, sino solamente que uno de los dos tiene que serlo. Cuando Clauser-Freedman confirmaron que las predicciones estadísticas de la teoría cuántica eran correctas, la sorprendente conclusión resultó inevitable: ¡El principio de las causas locales tiene que ser falso! Si el principio de las causas locales falla y, en consecuencia, el mundo no es lo que parece ser, ¿cuál es la naturaleza verdadera, real, de nuestro mundo?

Hay varias posibilidades que se excluyen mutuamente. La primera posibilidad, que ya hemos razonado, es que pese a las apariencias en contrario, realmente no hay «partes separadas» en nuestro mundo (en el dialecto de la física la «localización falla»). En este caso, la idea de que los sucesos son sucesos autónomos es una ilusión. Este será el caso para todas las «partes separadas» que han interactuado recíprocamente en cualquier momento del pasado. Cuando «partes separadas» interactúan recíprocamente, ellas (sus funciones de onda) se correlacionan (mediante el intercambio de señales convencionales) (fuerzas). A menos que esa interrelación sea alterada por otras fuerzas externas, las funciones de onda que representan a esas «cosas separadas» permanecen en correlación para siempre. * ** En lo que se refiere a esas «partes separadas», lo que un experimentador haga en una de esas zonas tendrá un efecto intrínseco sobre los resultados de un experimento que tenga lugar en una zona distante, espacial, separada. Esa posibilidad requiere una comunicación más-rápida-que-la-luz, de un tipo distinto, que la física convencional no puede explicar.

En esta imagen, lo que ocurre aquí está íntimamente ligado, de manera inmediata, con lo que ocurre en cualquier otra parte del universo, y así sucesivamente, y esto ocurre, sencillamente, porque las «partes separadas» del universo, no son partes separadas.

Como escribió David Bohm:

> «Las partes parecen estar en conexión inmediata, en la cual su relación dinámica depende en manera irreducible del estado del sistema total (y, desde luego, del estado de los sistemas más extensos en los cuales están contenidos, extendiéndose en principio y definitivamente por el universo entero). Con esto, uno se siente llevado a una nueva noción *de un todo no roto* que niega la idea clá-

*** De acuerdo con la teoría de Sarfatti las funciones de onda de las «partes separadas» a este nivel de la realidad y que están correlacionadas con las funciones de onda en el próximo nivel superior de la realidad, etc., son cosas reales y no simplemente abstracciones matemáticas.**

**** Si la teoría de la Gran Explosión (Big Bang) es verdadera, el universo entero está correlacionado desde el principio.**

sica que creía en la posibilidad de establecer un análisis del mundo en sus partes existentes separada e independientemente...»[11]

De acuerdo con la mecánica cuántica, los sucesos a nivel individual están determinados por el azar, la casualidad (pág. 83). Sabemos que la desintegración espontánea de un kaón positivo producirá un antimuón y un neutrino en un 63 % de los casos; un pion positivo y un pion neutro en el 21 % de los casos; dos piones positivos y un pion negativo en el 5,5 % de los casos; un neutrino y un pion neutro y un positrón en un 4,8 %; en un 3,4 % de los casos producirá un antimuón, un neutrino y un pion neutro, etc., etc. Sin embargo, la teoría cuántica no puede predecir *cuál* de estas desintegraciones producirá *tal* o *tal* resultado. Los sucesos a nivel individual de acuerdo con la teoría de la mecánica cuántica son completamente casuales.

Dicho de otra forma: la función de onda que describe la desintegración espontánea del kaón, contiene todos esos resultados posibles. Cuando una de esas potencialidades se convierte en realidad, todas las demás se invalidan. Si bien la probabilidad de cada uno de esos sucesos potenciales puede ser calculada, lo que realmente ocurra en el momento de la desintegración es cuestión de azar.

El Teorema de Bell, sin embargo, implica que, cualquiera que sea la reacción de desintegración que ocurra en un momento determinado, no es cuestión de azar. Como todo lo demás, depende de algo que está ocurriendo en otro lugar.*

En las palabras de Stapp:

«... La transformación de potencialidades en realidades no puede deducirse sobre la base de la información conseguida localmente. Si se aceptan las ideas en uso sobre el modo como se propaga la información por el espacio y el tiempo, el Teorema de Bell de-

* El aspecto no-local de la naturaleza, puesto al descubierto por el Teorema de Bell, se acomoda a la teoría cuántica por medio del colapso de la función de onda, que es un cambio repentino y global de la función de onda como sistema. Se produce cuando alguna parte del sistema es observada. Es decir, cuando se hace una observación del sistema en una región, la función de onda varía instantáneamente, y no sólo en esa región sino en otras muy distantes. Este comportamiento es completamente natural en una función que describe probabilidades, puesto que las probabilidades dependen de lo que se conoce como el sistema. Si el conocimiento que se tiene del sistema cambia como consecuencia del resultado de una observación, en ese caso la función de probabilidad (la amplitud de la función ondulatoria elevada al cuadrado) deberá cambiar. Por esta razón un cambio de la función de probabilidad en una región distante es normal incluso en la física clásica. Refleja el hecho de que las partes del sistema están correlacionadas entre sí y, por lo tanto, un incremento de la información aquí está acompañado por un incremento de la función del sistema en cualquier otra parte. Sin embargo, en la teoría cuántica este colapso de la función de onda es tal que aquello que *ocurre* en un lugar muy distante, en muchos casos tiene que depender de lo que el observador eligió observar. Lo que uno ve allí depende de lo que *yo hago* aquí. Éste es un efecto completamente no-local y no-clásico.

muestra que las respuestas macroscópicas no pueden ser independientes de causas distantes. El problema no se resuelve, y ni siquiera se alivia, diciendo que la respuesta está determinada por el «puro azar». El Teorema de Bell prueba, precisamente, que la determinación de la respuesta a nivel macroscópico tiene que estar «libre-del-azar», al menos hasta el punto de permitir algún tipo de dependencia de esta respuesta con la causa muy lejana.»[12]

La dependencia superlumínica del quanto parece ser, al menos superficialmente, una explicación posible para determinados tipos de fenómenos síquicos. La telepatía, por ejemplo, en muchas ocasiones nos causa la impresión de actuar instantáneamente, si no más rápido todavía. Los fenómenos síquicos han sido menospreciados por los físicos desde los días de Newton. En realidad son muchos los físicos que ni siquiera creen que existan.*

En este sentido el Teorema de Bell podría ser el caballo de Troya en la fortaleza de los físicos, en primer lugar porque prueba que la teoría cuántica requiere conexiones que parecen recordar la comunicación telepática y, segundo, porque ofrece el marco matemático dentro del cual los físicos serios (todos los físicos son serios) se pueden encontrar a sí mismos discutiendo algunos tipos de fenómenos que, irónicamente, ellos mismos no creen que existan.

El fracaso del principio de las causas locales no significa, necesariamente, que las conexiones superlumínicas existan en realidad. Por ejemplo: el principio de las causas locales — lo que ocurre en una zona no depende de variables sujetas al control de un experimentador que se encuentra en una zona separada y distante (espacial)) — se basa en dos hipótesis tácitas que resultan tan obvias que es fácil pasar sin prestarles atención.

Primero: el principio de las causas locales presupone que tenemos elección a la hora de decidir cómo vamos a llevar a cabo nuestros experimentos. Imaginemos que estamos realizando el experimento con fotones de Clauser-Freedman. Tenemos delante de nosotros un interruptor que determina la posición relativa en la que vamos a colocar los polarizadores. Si bajamos el interruptor los polarizadores se orientan formando ángulo recto. Supóngase que decidimos mover el interruptor hacia arriba, con lo que los polarizadores se alinean en una misma posición relativa. Normalmente, creemos que *podríamos* haber movido el interruptor hacia *abajo* y, de ese modo, alinear los polarizadores en ángulo recto si hubiéramos querido hacerlo así. En otras palabras, suponemos que teníamos libertad para decidir al comienzo del experimento cómo colocar el interruptor, si hacia arriba o hacia abajo.

* Existen desde luego, algunas notables excepciones, dos de las más importantes son Harold Puthoff y Russell Targ, cuyos experimentos sobre visión remota, realizados en el Instituto de Investigación de Stanford, han sido presentados en su libro *Mind-Reach* (Nueva York, Delacorte, 1977).

El principio de las causas locales supone («... variables sometidas al control de un experimentador...») que poseemos y podemos ejercer una voluntad libre en la determinación del modo como vamos a realizar nuestro experimento. Segundo, y esto es aún más fácil que pase inadvertido, el principio de las causas locales supone que si hubiéramos realizado nuestro experimento de modo distinto del que lo hemos hecho en realidad, hubiésemos obtenido resultados determinados. Estas dos suposiciones — que podemos elegir cómo realizar nuestro experimento, y que cada una de nuestras elecciones, incluso aquellas que no elegimos, produce, o podría haber producido, resultados determinados — es lo que Stapp llama «determinismo contrafactual».

En el caso que estamos explicando, el hecho es que decidimos realizar nuestro experimento con el interruptor hacia arriba. Suponemos, en consecuencia, que contrariamente a este hecho (de manera «contrafactual»), podríamos haberlo realizado con el interruptor en la posición inferior. Al realizar el experimento con el interruptor hacia arriba obtenemos algunos resultados determinados (un determinado número de señales en cada zona). Por lo tanto suponemos que si hubiéramos elegido realizar el experimento con el interruptor hacia abajo igualmente hubiéramos obtenido resultados determinados. (No es necesario que estemos en condiciones de calcular cuáles hubieran sido esos resultados.) Por raro que pueda parecer, y como tendremos ocasión de ver, algunas teorías físicas no suponen que «lo que hubiera sucedido si...» produzca resultados determinados.

Dado que el Teorema de Bell demuestra que, aceptando la validez de la teoría cuántica, el principio de las causas locales no es correcto; y si no queremos aceptar que la existencia de las conexiones superlumínicas («la incapacidad de localización») es la razón del fracaso del principio de las causas locales, nos vemos forzados a enfrentarnos con la posibilidad de que todas nuestras suposiciones sobre el determinismo contrafactual sean incorrectas («el determinismo contrafactual» falla). Dado que el determinismo contrafactual tiene dos partes, existen dos formas en las que puede fracasar.

La primera posibilidad es que el libre albedrío sea una ilusión («falla la contrafactualidad»). Quizá no existe ese «qué hubiera sucedido si...». Quizá sólo puede ser lo que es. En ese caso desembocamos en el *superdeterminismo,* que es un determinismo que está más allá del determinismo ordinario. El determinismo ordinario dice que tan pronto se ha establecido la situación inicial en un sistema, el futuro del sistema queda establecido dado que tiene que desarrollarse de acuerdo con las leyes inexorables de causa y efecto. Este tipo de determinismo fue la base de la idea de la Gran Máquina aplicada al universo (pág. 43). De acuerdo con ese punto de vista si la situación inicial de un sistema cambia, el futuro del sistema cambia también.

De acuerdo con el superdeterminismo, *ni siquiera la situación inicial del universo podría haber sido cambiada.* No sólo es imposible para cualquier cosa ser otra cosa que lo que es, sino que es imposible que la situa-

ción del universo pudiera haber sido otra de la que fue. No importa lo que estemos haciendo en un momento determinado, lo que quiera que hagamos es la única cosa que podríamos estar haciendo en ese momento.

Ese modelo superdeterminista de la realidad podría ser el punto de vista budista de la realidad, aunque, para un punto de vista budista, el principio no es muy bueno.

El concepto de «libre albedrío» se basa en la suposición de que «Yo» existo aparte del universo donde yo ejercito mi libre voluntad. Según el budismo, la separación entre el ego y el resto del universo es ilusoria. Por lo tanto, si yo *soy* el universo, ¿sobre qué puedo ejercer mi libre albedrío? El libre albedrío es una ilusión del ego.

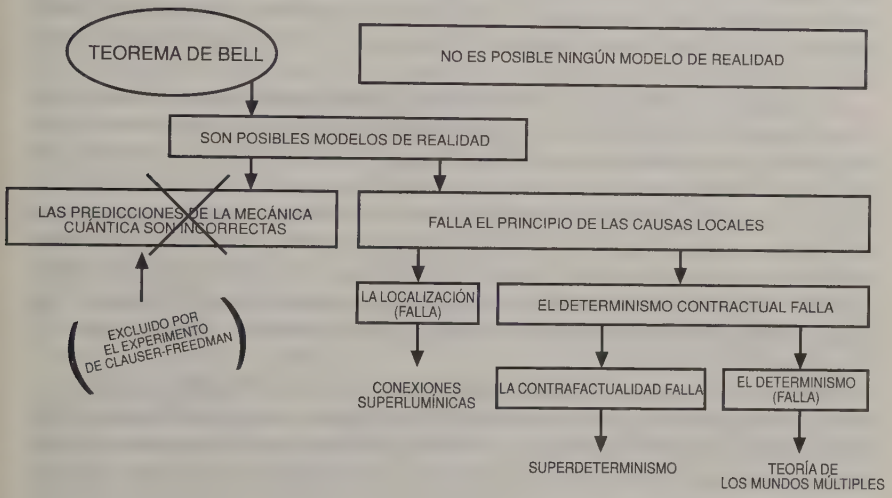
El determinismo contrafactual fracasa si la suposición determinista contenida en él falla. En ese caso tenemos una posibilidad de elegir el modo cómo efectuar nuestro experimento, pero «qué hubiera sucedido si...» no nos conduce a ningún resultado determinado. La alternativa es exactamente tan extraña como suena. Es, precisamente lo que se dedice de la Interpretación de los Mundos Múltiples de la Mecánica Cuántica (pág. 98). De acuerdo con la teoría de los Mundos Múltiples cada vez que se realiza una elección en el universo, entre un suceso posible y otro, el mundo se divide en diferentes ramas.

En nuestro hipotético experimento decidimos colocar el interruptor en la posición «arriba»; al hacerlo así el experimento nos dio un resultado determinado (un cierto número de señales en cada zona). De acuerdo con la teoría de los Mundos Múltiples, en el momento en que situamos el interruptor en la posición «arriba», el universo se dividió en dos ramas. En una de ellas el experimento se estaba realizando con el interruptor en posición «arriba». En la otra rama el experimento se estaba realizando con el interruptor en la posición «abajo». ¿Quién realiza el experimento en la segunda rama? ¡*Nosotros* lo hacemos! Hay una diferente edición de *nosotros* en cada una de las distintas ramas del universo. Cada edición de nosotros está convencida de que *nuestra* rama del universo es enteramente toda la realidad.

El experimento en la segunda rama del universo, el experimento en el cual el interruptor está en la posición «abajo», también produce un resultado determinado (un cierto número de señales en cada zona). Sin embargo, el resultado se produce en otra rama del universo, no en la nuestra. Por lo tanto, en lo que se refiere a nosotros, a los que estamos en esta rama del universo, «lo que hubiera sucedido si...», realmente sucedió y realmente produce resultados determinados, pero en una rama del universo que está, para siempre, más allá de nuestra experiencia de la realidad.*

* Una ramificación ocurre también cuando lo que se elige son los resultados, lo cual puede ser aclarado con el experimento EPR. En la rama original del universo donde, por ejemplo, el eje del campo magnético es vertical, y en consecuencia, el resultado es un *espín hacia arriba* o un espín hacia *abajo*, una ramificación de dos «gemelos». En el primer «gemelo» el resultado es un espín hacia

A continuación ofrecemos un diagrama de las implicaciones lógicas del Teorema de Bell. Ha sido construido de acuerdo con algunos cambios de impresiones informales del Grupo de Física Fundamental en el Laboratorio de Lawrence Berkeley, bajo la dirección y el patronato de la doctora Elizabeth Rauscher. Estos cambios de impresiones, a su vez, estaban basados sobre los trabajos de Henry Stapp.



Resumiendo, el Teorema de Bell demuestra, como fue expuesto en 1964, que o bien las predicciones estadísticas de la teoría cuántica son falsas, o el principio de las causas locales es falso. En 1972, Clauser y Freedman realizaron un experimento en Berkeley que probó la validez de las notables predicciones estadísticas de la teoría cuántica. Por lo tanto el principio de las causas locales *tiene* que ser falso.

El principio de las causas locales dice que lo que ocurre en un área no depende de variables sujetas al control de un experimentador situado en una zona separada espacialmente. Si esta explicación es correcta, en ese caso vivimos en un universo no-local («la localización falla») que se ca-

---

arriba y en el segundo un espín hacia abajo. De manera semejante, en la segunda rama, donde el eje del campo magnético es horizontal, se produce igualmente una ramificación en dos gemelos. En el primero de estos gemelos el resultado es un espín a la *derecha,* en la segunda de ellas a la *izquierda.*

Por lo tanto, en cada uno de los gemelos dados, de cualquier rama, hay resultados determinados (espín hacia *arriba,* hacia *abajo,* a la *derecha* o la *izquierda*), pero la idea de «qué hubiera sucedido si uno hubiera elegido la "otra rama" no tiene sentido, pues ambos resultados (*arriba* o *abajo,* o *derecha* o *izquierda*) se dan en distintas ramas. Por lo tanto, los resultados de la «otra» rama no son determinados.

racteriza por conexiones superlumínicas (más rápidas que la luz) entre «partes separadas» aparentemente.

Sin embargo, hay otras formas de fallo para el principio de las causas locales. Este principio se basa en dos supuestos tácitos. El primero de ellos es que tenemos la capacidad para determinar nuestras propias acciones, es decir, que tenemos libre albedrío.* El segundo supuesto tácito es que cuando elegimos una forma de hacer las cosas, en vez de elegir otra, lo «que podría haber sucedido si...» hubiera llegado a producir resultados determinados. Estos dos supuestos unidos son lo que Stapp llama determinismo contrafactual.

El primer supuesto (contrafactualidad) falla cuando nos conduce a un superdeterminismo que anula la idea de posibilidades de alternativa. Según este tipo de determinismo no es posible que el mundo *jamás* pudiera haber sido otro del que es.

Si el segundo supuesto (determinismo) falla, acabamos en la teoría de los Mundos Múltiples, en la cual el mundo se está dividiendo de manera continua en ramas separadas e inaccesibles entre sí, cada una de las cuales contiene distintas ediciones de los mismos actores realizando distintos actos al mismo tiempo en distintos escenarios que, de algún modo, están localizados en el mismo sitio.

Es posible que haya otras formas de comprender el fallo del principio de las causas locales, pero el hecho mismo de que tenga que fracasar significa que el mundo, de algún modo, es profundamente distinto de las ideas que tenemos sobre él. (Quizá, de hecho, estamos viviendo en una caverna a oscuras).

En el diagrama, la opción «no es posible ningún modelo» es la Interterpretación de Copenhague de la Mecánica cuántica (pág. 56). En 1927, el grupo más notable de físicos de la historia decidió que podría suceder que ni siquiera fuese posible construir un modelo de realidad, es decir, explicar la forma como son las cosas «realmente, entre bastidores». Pese a la marea de «conocimiento» que nos ha invadido en el transcurso de treinta años, el Grupo de Física Fundamental, como los físicos reunidos en Copenhague medio siglo antes que ellos, se vio obligado a reconocer que tal vez no fuese posible construir un modelo de la realidad. Este reconocimiento es más que la admisión de las limitaciones de ésta o aquella teoría. Es un reconocimiento que se está abriendo paso en Occidente de que el *conocimiento en sí* es limitado. Dicho de otro modo, es el reconocimiento de la diferencia entre conocimiento y sabiduría.**

* Los físicos usualmente utilizan frases filosóficas (como «libre albedrío») en términos más precisos. Por ejemplo: el concepto de libre albedrío es definido, dentro de esta situación experimental, como un supuesto tácito de que «cada uno de los dos observadores, uno localizado en la zona A y el otro situado en la zona B, puede elegir entre dos posibles observaciones (experimentos)». Estas dos posibles elecciones son consideradas como «variables libres» en el contexto del estudio de las observaciones realizadas en el sistema de dos partículas.

** De hecho son mayoría los físicos que *no* creen que valga la pena pensar en estos problemas. La consecuencia más importante de la Interpretación de Copen-

La ciencia clásica comienza con el supuesto de la existencia de partes separadas que, en su conjunto, constituyen la realidad física. A partir de este principio, la ciencia ha venido preocupándose por saber cómo se relacionan entre sí estas partes separadas.

La gran obra de Newton demuestra que la tierra, la luna y los planetas están regidos por las mismas leyes que gobiernan la caída de las manzanas. El matemático francés Descartes descubrió un modo de representar, mediante dibujos, las relaciones entre diferentes medidas de tiempo y distancia. Este procedimiento, la geometría analítica, es un instrumento maravilloso para dar organización a un número abundante de datos repartidos en un modelo significativo. Reúne los resultados de experiencias aparentemente sin relación entre sí en un marco racional de conceptos propios, como, por ejemplo, las leyes del movimiento. El punto de partida de este proceso es una actitud mental que, inicialmente, percibe el mundo físico como fragmentado y ve las distintas experiencias como sucesos sin relación lógica entre ellos. La ciencia newtoniana es el esfuerzo en busca de las relaciones entre «partes separadas» preexistentes.

La mecánica cuántica se basa en el supuesto epistemológico opuesto. Ésa es la razón de las profundas diferencias existentes entre la física de Newton y la teoría cuántica.

La más fundamental de estas diferencias es el hecho de que la mecánica cuántica se basa en *observaciones* (mediciones). Sin esas mediciones la mecánica sería muda. La mecánica cuántica no nos dice nada sobre lo que ocurre entre esas mediciones. En palabras de Heisenberg: «El término "suceso" queda restringido a las observaciones.»[13] Esto resulta muy importante puesto que constituye una filosofía de la ciencia distinta a toda la anterior.

Por ejemplo: de ordinario solemos decir que detectamos un electrón en el punto A y después en el punto B, pero estrictamente hablando esto resulta incorrecto. De acuerdo con la mecánica cuántica no existe un electrón que se desplace del punto A al punto B. Lo único existente son las mediciones realizadas en el punto A y en el punto B.

La teoría cuántica no sólo está estrechamente ligada a la filosofía, sino

---

hague, que condujo a que la interpretación de la teoría cuántica fuese aceptada por la mayor parte de la comunidad científica, consistió en admitir que el verdadero objetivo de la ciencia es facilitar un marco-base matemáticos para organizar y extender nuestras experiencias, más que ofrecernos una imagen de la realidad existente tras esas experiencias. Esto es: en la actualidad la mayor parte de los físicos se alinean con Bohr, más que al lado de Einstein, en la cuestión de la utilidad de buscar un modelo de realidad que pueda ser concebido con independencia de nuestra experiencia de ello. Desde el punto de vista de la interpretación de Copenhague, la teoría cuántica es satisfactoria tal y como es en sí y el esfuerzo para comprenderla de manera más profunda no resulta productivo para la ciencia y conduce a perplejidades del tipo que hemos descrito, que a la mayor parte de los físicos les parecen más filosóficas que físicas. Por esta razón, la mayor parte de los físicos eligen la opción «no modelo» del diagrama.

también — y esto se viene haciendo cada vez más aparente — a las teorías de la percepción. Ya en una época tan relativamente temprana como el año 1935, von Neumann exploró esta relación en su «Teoría de la Medida» (Exactamente, ¿cuándo se derrumba la función de onda asociada a una partícula? ¿Cuando la partícula choca con la placa fotográfica? ¿Cuando la placa fotográfica es revelada? ¿Cuando los rayos de luz de la placa revelada llegan a nuestra retina? ¿Cuando el impulso nervioso de la retina llega al cerebro?) (pág. 91).

El principio de complementariedad de Bohr (pág. 104) también se refiere a la destacada relación existente entre la física y la consciencia. La elección que el experimentador hace del tipo de experimento a realizar determina cuál de los aspectos, mutuamente excluyentes, del mismo fenómeno (onda o partícula), acabará por manifestarse. Del mismo modo, el principio de incertidumbre de Heisenberg (pág. 120) demuestra que no podemos observar un fenómeno sin modificarlo. Las propiedades físicas del mundo «externo» están entrelazadas con nuestras percepciones, no sólo de manera sicológica, sino también ontológica.

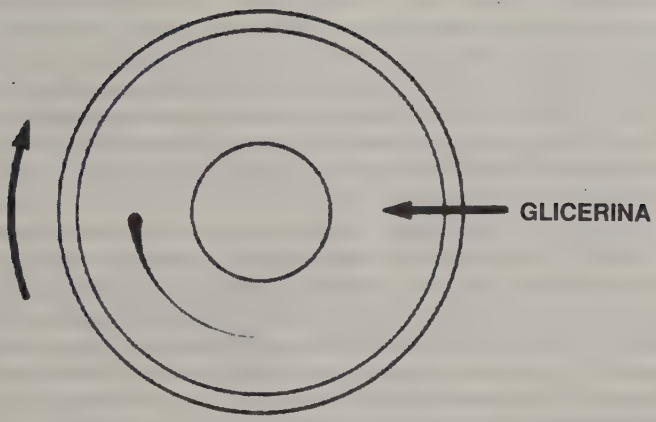
La segunda diferencia más fundamental entre la física de Newton y la teoría cuántica es que la primera predice sucesos mientras que la mecánica cuántica predice la probabilidad de los sucesos. De acuerdo con la mecánica cuántica la única relación determinable entre sucesos es de índole estadística, es decir cuestión de probabilidad.

David Bohm, profesor de Física del Birkbeck College, de la Universidad de Londres, propone que la física cuántica, de hecho, está basada en la percepción de un nuevo orden. De acuerdo con Bohm, «Tenemos que hacer que la física dé un giro total. En vez de comenzar con las partes y demostrar cómo actúan conjuntamente (orden cartesiano) nosotros comenzamos con el todo».[14]

La teoría de Bohm es compatible con el Teorema de Bell, que implica que las «partes» aparentemente «separadas» del universo pueden estar íntimamente conectadas a un nivel profundo y fundamental. Bohm afirma que el nivel más fundamental es un *todo inseparable* que es, en sus propias palabras, «aquello-que-es». Todas las cosas, incluso el espacio y el tiempo y la materia, son formas de «aquello-que-es». Existe un orden que se integra en el auténtico proceso del universo, pero este orden por lo visto, no es fácilmente aparente.

Imaginemos, por ejemplo, un gran cilindro hueco dentro del cual está colocado otro cilindro más pequeño. El espacio entre los dos cilindros está lleno con un líquido claro y viscoso, como la glicerina (este aparato existe en realidad).

Ahora supongamos que depositamos una pequeña gota de tinta en la superficie de la glicerina. Debido a la naturaleza de la glicerina, la tinta permanece intacta, como una mancha negra bien definida que flota en un líquido claro.



Si comenzamos a girar uno de los cilindros, por ejemplo en dirección como la que siguen las manecillas de un reloj, la mancha de tinta se extiende en dirección opuesta trazando una línea que se va haciendo cada vez más delgada hasta desaparecer por completo. La mancha de tinta está integrada por completo en la glicerina, aparentemente disuelta en ella, pero *continúa estando allí.* Si hacemos girar el cilindro en dirección opuesta la gota de tinta reaparece. Primero aparece una línea muy delgada que se va haciendo cada vez más gruesa hasta quedar concentrada en un solo punto.

Si una vez que la gota ha vuelto a concentrarse continuamos girando el cilindro en la misma dirección, ocurre lo mismo, pero a la inversa. Podemos repetir este proceso tantas veces como deseemos. Cada vez que lo hagamos, la mancha de tinta se transforma en una línea cada vez más delgada hasta acabar por desaparecer por completo en la glicerina; para reaparecer, de nuevo, cuando el movimiento de la glicerina se hace de signo contrario.

Si se necesita una revolución completa del cilindro para que la gota de tinta desaparezca completamente, una revolución completa del cilindro — en dirección opuesta — la hará reaparecer en su forma y posición originales. El número de vueltas que se necesita para hacer que la gota desaparezca — o reaparezca — es lo que Bohm llama el «orden implicado».

Supongamos que depositamos una gota de tinta en la superficie de la glicerina, giramos el cilindro, en la dirección que siguen las manecillas de un reloj, hasta que la gota desaparezca (en este caso una revolución); añadimos una segunda gota de tinta en la glicerina, continuamos haciendo girar el cilindro en la misma dirección hasta que la segunda gota desaparece (otra revolución más) y, después, añadimos una tercera gota de tinta y le damos al cilindro una revolución más hasta que la tercera gota ha desaparecido. Tenemos tres gotas de tinta integradas en la glicerina. Ninguna de

ellas está visible, pero sabemos donde está situada cada una de ellas en el orden implicado.

Cuando giramos el cilindro en la dirección opuesta, una gota de tinta (la tercera) aparecerá después de una revolución; otra gota de tinta (la segunda) reaparecerá después de una nueva revolución completa, y otra gota de tinta (la primera) hará su aparición tras una nueva revolución. Este es el orden explicado, o desplegado. En el mundo explicado (desplegado) las tres gotas de tinta no parecen estar relacionadas entre sí, pero sabemos que lo están en el orden implicado.

Si consideramos a las gotas de tinta de este experimento como «partículas», tenemos la hipótesis de Bohm sobre la aparente falta de relación entre los fenómenos subatómicos. «Las partículas» pueden aparecer en distintos lugares y, sin embargo, estar conectadas, relacionadas, en el orden implicado. En palabras de Bohm: «Las partículas pueden ser discontinuas en el espacio (el orden explicado), pero continuas en el orden implicado».[15]

«La materia es una forma del orden implicado del mismo modo que un torbellino es una forma del agua, que no es reducible a particulas más pequeñas».[16] Al igual que la «materia» o cualquier otra cosa, las partículas son formas del orden implicado. Si esto resulta difícil de captar es porque nuestra mente exige saber «¿qué es el orden implicado»?, ¿«el orden implicado de qué?»

El «orden implicado» es el orden implicado de aquello-que-es. Sin embargo, aquello-que-es, *es* el orden implicado. Este punto de vista sobre el mundo es tan diferente del que estamos acostumbrados a utilizar que, como Bohm señala, «la descripción es totalmente incompatible con lo que queremos decir».[17] Y esto es así porque nuestro pensamiento está basado en una forma antigua de pensamiento griego. De acuerdo con esta forma de pensar, sólo Ser es. En consecuencia, No-ser, *no es*. Esta manera de pensar nos da un instrumento práctico para actuar en el mundo pero no describe lo que ocurre. En realidad No-ser también *es*. Tanto Ser como No-ser son aquello-que-es. *Todo,* incluso el «vacío», es aquello-que-es. No hay nada que no sea aquello-que-es.

Esta forma de contemplar la realidad hace surgir la cuestión de la conscienciación del observador. Nuestras mentes exigen saber, ¿«Qué es el "orden implicado", el orden implicado de qué?», debido a que nuestra cultura nos ha enseñado a percibir, solamente, el orden explicado (el punto de vista cartesiano). Para nosotros «las cosas» están intrínsicamente separadas.

La física de Bohm requiere, de acuerdo con sus palabras, un nuevo instrumento de pensamiento. Pero ese nuevo instrumento, tal y como se necesitaría para entender la física de Bohm, cambiaría de modo radical la consciencia del observador, reorientándola hacia una percepción del «todo» del cual todas las cosas son una forma.

Una percepción de ese tipo, sin embargo, no causaría una incapacidad de ver el orden explicado. La física de Bohn contiene un elemento de relatividad paralelo al de las teorías de Einstein. La naturaleza implicada o

explicada del orden depende de la perspectiva del observador. El problema está en que nuestro punto de vista presente está limitado a la perspectiva del orden explicado. Desde la perspectiva del orden implicado los «elementos» aparentemente «separados» del orden explicado están íntimamente relacionados. Incluso los términos «elementos» y «íntimamente relacionados» implican un concepto de separación cartesiana que no existe. Al nivel fundamental de aquello-que-es, los «elementos separados» que están «íntimamente relacionados en el orden implicado» *son* el orden implicado.

La necesidad de un nuevo instrumento de pensamiento con el que basar la comprensión de la física de Bohm es posible que no resulte un obstáculo tan grande como a primera vista podría parecer. Existe ya uno de esos instrumentos basado en el «todo». Y existen, además, un número de sicologías muy elaboradas, producto de dos mil años de práctica e introspección, cuyo único propósito es el desarrollo de semejante instrumento mental.

Esas psicologías son lo que comúnmente llamamos «Religiones Orientales». Estas religiones difieren entre sí de manera considerable. Sería un tremendo error considerar que el hinduismo y el budismo, por ejemplo, son iguales, aunque entre ellos existe una semejanza mayor que la de cualquiera de ellas con una religión occidental. Sin embargo, todas las religiones orientales (psicologías) son compatibles de modo fundamental con la física y con la filosofía de Bohm. Todas ellas se basan en la experiencia de una realidad pura e indiferenciada que es aquello-que-es.

Mientras resultaría ingenuo exagerar las semejanzas entre la física de Bohm y las filosofías orientales, sería estúpido ignorarlas. Consideremos por ejemplo las siguientes frases:

> La palabra «realidad» está derivada de las raíces «cosa» (*res*) y «pensar» (*revi*). Realidad, por lo tanto, significa «todo aquello en lo que se puede pensar». Esto no es «aquello-que-es». Ninguna idea pueda captar la «verdad» en el sentido de aquello-que-es.

> La percepción definitiva no tiene su origen en el cerebro ni en ninguna otra estructura material, aunque una estructura material es necesaria para que se manifieste. El sutil mecanismo de conocimiento para llegar a la verdad no se origina en el cerebro.

> Existe una semejanza entre pensamiento y materia. Toda la materia, incluso nosotros mismos, está determinada por la «información». La «información» es lo que determina espacio y tiempo.

Partiendo de su contenido no habría forma, en absoluto, de saber si esas declaraciones fueron hechas por el profesor Bohm o por un budista tibetano. En realidad estas frases han sido extraídas de distintas partes de dos lecciones de física dadas por el profesor Bohm en Berkeley, en abril de 1977.

La primera de las lecciones les fue dada a los estudiantes de física de aquella universidad; la segunda, en el Laboratorio Lawrence Berkeley a un grupo de físicos profesionales. La mayor parte de esas frases ha sido tomada de la *segunda* lección, es decir la dedicada a físicos adelantados.

Resulta irónico ver que mientras las teorías de Bohm son recibidas con cierto escepticismo por la mayoría de los físicos profesionales, encontraron un recibimiento positivo, de inmediato, entre los miles de personas de nuestra cultura que le han vuelto las espaldas a la ciencia en su búsqueda de la naturaleza definitiva de la realidad.

Si la física de Bohm, u otra semejante, llegara a convertirse en la más destacada de las ramas futuras de la física, las danzas del Oriente y el Occidente podrían mezclarse en una exquisita armonía. No sería sorprendente que entre las asignaturas de la física en el siglo XXI se incluyera la meditación transcendental.

* * *

La función de las religiones orientales (sicologías) es permitir que la mente escape a los límites de lo simbólico. De acuerdo con este punto de vista, *todas las cosas* son símbolos, no las palabras y los conceptos, sino las personas y las cosas. Más allá de los confines de lo simbólico está lo que es, pura «consciencia»: la experiencia de la «semejanza» de la realidad.

Sin embargo, incluso las religiones orientales recurren al uso de los símbolos para escapar al terreno de lo simbólico. Algunas disciplinas utilizan los símbolos más frecuentemente que otras, pero todas los emplean en una forma u otra. Por consiguiente, surge la pregunta de, si el conocimiento puro es considerado distinto del contenido del conocimiento, ¿de qué manera concreta el contenido del conocimiento afecta a la realización del conocimiento puro? ¿Qué tipos de contenido impulsan a la mente a seguir adelante? ¿Qué es lo que le permite activar su capacidad de autoplenitud para transcenderse a sí misma?

Resulta muy difícil responder a estas cuestiones. La respuesta sólo puede ser un punto de vista. Y un punto de vista siempre está limitado en sí mismo. «Comprender» algo es renunciar a los demás caminos de concebirlo. Esta es otra forma de decir que la mente actúa en formas de limitación. Pese a todo, existe, eso sí, una relación entre el contenido del conocimiento y la habilidad de la mente para transcenderse a sí misma.

«Realidad» es aquello que tomamos por cierto. Lo que tomamos por cierto es aquello en que creemos. Nuestras creencias se basan en nuestras percepciones. Lo que percibimos depende de lo que tratamos de ver. Lo que tratamos de ver depende de lo que pensamos. Lo que pensamos depende de lo que percibimos. Lo que percibimos determina lo que creemos. Lo que creemos determina a su ver, lo que tomamos por verdad. Y lo que tomamos por verdad es nuestra realidad.

El enfoque central de este proceso, inicialmente en todos los casos, es «Lo que pensamos». Podemos decir, cuando menos, que la fidelidad a un

símbolo de apertura (Cristo, Buda, Krishna, la «infinita diversidad de la naturaleza», etc.) parece abrir nuestra mente y que una mente abierta es, frecuentemente, el primer paso en el proceso de la iluminación.

El «gestalt» sicológico de la física viene tendiendo radicalmente en el último siglo hacia unas formas de extrema franqueza. A mediados del siglo XIX, la mecánica de Newton se hallaba en su cenit. Parecía no existir ni un solo fenómeno que no pudiera ser explicado en términos de modelos mecánicos. Todos los modelos mecánicos estaban sometidos a principios establecidos de antiguo. El director del Departamento de Física de Harvard trató de desanimar a aquellos que querían prolongar sus estudios, basándose en que, a su juicio, eran muy pocas las cosas importantes que quedaban por resolver.[18]

En un discurso dirigido a la Royal Institution, en 1900, Lord Kelvin expresó sus ideas de que sólo quedaban dos «nubes» en el cielo de la física: el problema de la radiación de los cuerpos negros y el experimento de Michelson-Morley.[19] No había duda, dijo Kelvin, de que pronto serían aclaradas. Se equivocaba. Las dos «nubes» de Kelvin señalaban el fin de la era que comenzó con Galileo y con Newton. El problema de la radiación de los cuerpos negros condujo a Planck al descubrimiento del quanto de acción. En los treinta años siguientes la totalidad de la física newtoniana pasó a ser un caso especialmente limitado de la teoría del quanto que estaba en plena evolución. El experimento de Michelson-Morley dejó en la sombra a las famosas teorías de la relatividad de Einstein. En 1927, los fundamentos de la nueva física, la mecánica cuántica y la relatividad, estaban en pleno apogeo.

En contraste con la época de Kelvin, la fidelidad de los físicos en la actualidad se ha convertido en un símbolo de extrema franqueza. En 1975, Isidor Rabi, Premio Nobel y director «emeritus» del Departamento de Física en la Universidad de Colombia, escribía:

> «No creo que la física tenga fin jamás. Pienso que la novedad de la naturaleza es tal, que su variedad será infinita, y no solo en las formas cambiantes, sino en la profundidad de los conceptos y en la novedad de las ideas...»[20]

Stapp escribiría, también, en 1971:

> «... La humanidad podrá continuar indefinidamente su búsqueda para descubrir nuevas verdades importantes...»[21]

El «lo que nosotros pensamos» de los físicos actuales es que la física de la naturaleza, como la experiencia humana en sí, es infinitamente diversa.

Las religiones orientales no tienen nada que decir sobre física, pero sí mucho sobre la experiencia humana. En la mitología hindú, Kali, la Madre Divina, es el símbolo de la diversidad infinita de la experiencia. Kali re-

presenta todo el plano físico. Es el drama, la tragedia, el humor y la pena de la vida. Es el hermano, el padre, la hermana, la madre, el amante y el amigo. Es el enemigo, el monstruo, la bestia y el bruto. Es el sol y el océano. Es la hierba y el rocío. Es nuestro sentido de realización y nuestro sentido de que estamos haciendo algo que vale la pena. Nuestra emoción por los nuevos descubrimientos es un adorno en el brazalete de la diosa. Nuestro sentido de la importancia es la campanilla en su tobillo.

Esta madre de la tierra, total y seductora, terrible y maravillosa, tiene *siempre* algo que ofrecer. Los hindúes conocen la imposibilidad de seducirla o conquistarla y la inutilidad de amarla o de odiarla. En consecuencia hacen lo único que pueden: honrarla.

En un determinado relato, Kali, la Madre Divina, es Sita, la esposa de Dios. Ram es Dios. Ram, Sita y Laksaman, el hermano de Ram, caminan por una estrecha senda en la jungla. El camino es tan angosto que la mayor parte del tiempo Laksaman sólo puede ver a Sita, que camina entre él y Ram. Pero, repentinamente, el camino se gira de tal manera que Laksaman puede ver a su hermano Dios.

Esta vigorosa metáfora tiene aplicación al drama de la física, hoy en pleno desarrollo. Pese a que la mayor parte de los físicos tienen poca paciencia (profesional) para las metáforas, la propia física se ha convertido en una gran metáfora. La física del siglo XX es la historia de un viaje desde la cerrazón intelectual hasta la franqueza intelectual, pese a la naturaleza conservadora del «pruébamelo» de los físicos. La aceptación de que los descubrimientos de la física *nunca* tendrán fin ha llevado a los físicos, así como a aquellos que han seguido de cerca la historia de la física, a una llanura extremadamente fértil. Esa aceptación invita al intelecto a seguir hacia adelante, pese al gran riesgo que esto significa para su hegemonía.

Los Maestros de Wu Li saben que los físicos están haciendo algo más que «descubrir la diversidad infinita de la naturaleza». Están bailando con Kali, la Madre Divina de la mitología hindú.

* * *

El budismo es ambas cosas: filosofía y práctica. La filosofía budista es rica y profunda. La práctica budista es llamada *Tantra*. *Tantra* significa, en sánscrito, «tejer». Sobre *Tantra* puede decirse poca cosa. Hay que hacerlo.

La filosofía budista alcanzó su desarrollo cumbre en el siglo II. Desde entonces nadie ha sido capaz de mejorarla mucho. La distinción entre filosofía budista y *Tantra* es bien clara y definida. La filosofía budista puede ser intelectualizada. El *Tantra,* no. La filosofía budista es una creación de la mente racional. *Tantra* transciende la racionalidad. Los pensadores más profundos de la civilización india descubrieron que las palabras y los conceptos solamente podían llevarlos hasta allí. Más allá de ese punto sólo queda el ejercicio de una práctica cuya experiencia resulta inefable. Esto no les impide ir refinando progresivamente la práctica hasta convertirla en una serie de técnicas extremadamente efectivas y sofisticadas, pero sí les

impide describir las experiencias que esas técnicas producen.

La práctica del *Tantra* no significa el final del pensamiento racional, sino la integración del pensamiento basado en los símbolos, en unos espectros de conocimiento más amplios. El desarrollo del budismo en la India demuestra que una investigación intelectual profunda y penetrante en la naturaleza definitiva de la realidad puede culminar en — o al menos preparar la escena para — un salto cuántico más allá de la racionalidad. De hecho, a un nivel individual, este es uno de los caminos que conducen a la iluminación. El budismo tibetano lo llama la Senda sin Forma, o la Práctica de la Mente. La Senda sin Forma se le prescribe a la gente que tiene temperamento intelectual. La ciencia física está siguiendo una senda semejante.

El desarrollo de la física en el siglo xx ya había transformado la consciencia de los que con ella están relacionados. El estudio de la complementariedad (página 104), el principio de incertidumbre (página 120), la teoría cuántica de campos (pág« 200) y la Interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica (pág. 56) producen conocimientos íntimos de la naturaleza de la realidad muy semejantes a los producidos por el estudio de la filosofía. Los más profundos físicos de este siglo se han venido haciendo cada vez más conscientes de que se están enfrentando a lo inefable.

Max Planck, el padre de la mecánica cuántica, escribió:

> «La ciencia... significa una conducta sin descanso, un desarrollo en continuo progreso hacia un objetivo que la intuición poética puede captar, pero que el intelecto nunca llegará a entender por completo.»[22]

Nos estamos aproximando al fin de la ciencia. Pero «El fin de la ciencia» no tiene por qué significar el fin «de una conducta sin descanso y un desarrollo en continuo progreso» de teorías físicas más y más comprensivas y útiles. (Los físicos «iluminados» también recuerdan sus códigos cifrados.) El «fin de la ciencia» significa la llegada de la civilización Occidental, en su propio tiempo y por su propio camino, a las más altas dimensiones de la experiencia humana.

El profesor G. F. Chew, Director del Departamento de Física en Berkeley, refiriéndose a la teoría de la física de las partículas observó:

> «Nuestra lucha actual con la física superior podría, por esa razón, ser tan sólo un anticipo de una nueva forma de conducta intelectual humana, que no sólo está fuera de la física, sino que ni siquiera puede ser descrita como "científica".»[23]

No necesitamos hacer un peregrinaje a la India o al Tibet. Hay mucho que estudiar allí, pero aquí, en casa, en los lugares más inconcebibles, entre los aceleradores de partículas y las computadoras, está surgiendo nues-

tra propia Senda sin Forma.

Al Huang, el Maestro de Tai Chi que creó la metáfora de Wu Li, escribió en cierta ocasión:

> «...siempre, más tarde o más temprano, llegamos a un callejón sin salida cuando hablamos.»[24]

Igualmente podría haber dicho que, más tarde o más temprano, siempre nos ponemos a dar vueltas en círculo cuando hablamos, puesto que girar en círculo es una especie de callejón sin salida.

Estábamos sentados en una pequeña cabaña en Esalen, ya muy entrada la noche, cuando mi reciente amigo David Finkelstein nos habló suavemente:

> «Creo que nos lleva a error el llamar partículas a los entes que participan en los sucesos más primarios de la teoría (topología del quanto), porque no se mueven en el espacio ni en el tiempo. No llevan masa, no tienen carga ni tienen energía, en el sentido corriente de la palabra.»

PREGUNTA: ¿Entonces qué es lo que causa los sucesos a ese nivel?

RESPUESTA: ¿Quiénes son los danzarines y quién la danza? Ellos no tienen otros atributos más que la danza.

PREGUNTA: ¿Qué es «ellos»?

RESPUESTA: Las cosas que danzan, los danzarines. ¡Dios mío! ¡Hemos vuelto al título del libro![25]

NOTAS

EPÍGRAFES

1. Albert Einstein y Leopold Infeld, *The Evolution of Physics,* Nueva York, Simon and Schuster, 1938, pág. 27.
2. Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy,* Harper Torchbooks, Nueva York, Harper and Row, 1958, pág. 168.
3. Erwin Schrödinger, *Sciencie and Humanism,* Cambridge, Inglaterra, Cambridge University Press, 1951, págs. 7-8.

UNA GRAN SEMANA EN GRAN SUR

1. Al Chung-liang Huang, *Embrace Tiger, Return to Mountain,* Moab (Utah), Real People Press, 1973, pág. 1.
2. Albert Einstein y Leopold Infield, *The Evolution of Physics,* Nueva York, Simon and Schuster, 1938, pág. 31.
3. Isidor Rabi, «Profiles-Physicist, I», *The New Yorker Magazine,* 13, octubre de 1975.

A EINSTEIN NO LE GUSTA

1. Albert Einstein y Leopold Infeld, *The Evolution of Physics,* Nueva York, Simon and Schuster, 1938, pág. 31.
2. *Ibid.,* pág. 152.
3. Werner Heisenberg, *Across the Frontiers,* Nueva York, Harper and Row, 1974, pág. 114.
4. Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (trad. Andrew Motte), reimpresa en *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World* (trad. revisada de Florian Cajori), Berkeley, University of California Press, 1964, pág. 547.
5. *Proceedings of the Royal Society of London,* vol. 54, 1893, pág. 381, que se refiere a la *Correspondence of R. Bentley,* vol. I, pág. 70. Hay también una explicación sobre la acción-a-distancia de Clerk Maxwell, en *Nature,* volumen VII, 1872, pág. 325.
6. Joseph Weizenbaum, *Computer Power and Human Reason,* San Francisco, Freeman, 1976.
7. Niels Bohr, *Atomic Theory and Human Knowledge,* Nueva York, John Wiley, 1958, pág. 62.

8. J. A. Wheeler, K. S. Thorne and C. Misner, *Gravitation*, San Francisco, Freeman, pág. 1.273.
9. Carl G. Jung, *Collected Works*, vol. 9 (Bollingen Series), XX, Princeton, Princeton University Press, 1955, pág. 175.
10. Carl G. Jung y Wolfgang Pauli, *The Interpretation of Nature and the Psyche* (Bollingen Series, LI), Princeton, Princeton University Press, 1955, pág. 175.
11. Albert Einstein, «On Physical Reality», *Franklin Institute Journal*, 221, 1936, págs. 349 y sigs.
12. Henry Strapp, «The Copenhaguen Interpretation and the Nature of Space-Time», *American Journal of Physics*, 40, 1972.
13. Robert Ornstein, ed., *The Nature of Human Consciousness*, Nueva York, Viking, 1974, págs. 61-149.

¿ENTES VIVOS?

1. Victor Guillemin, *The Story of Quantum Mechanics*, Nueva York, Scribner's, 1968, págs. 50-51.
2. Max Planck, *The Philosophy of Physics*. Nueva York, Norton, 1936, pág. 59.
3. Henry Stapp, «Are Superluminal Connections Necessary?», *Nuovo Cimento*, 40B, 1977, pág. 191.
4. Evan H. Walker, «The Nature of Consciousness», *Mathematical Biosciences*, 7, 1970, págs. 175-176.
5. Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Nueva York, Harper and Row, página 41.

LO QUE SUCEDE

1. Max Born y Albert Einstein, *The Born-Einstein Letters*, Nueva York, Walker and Company, 1971, pág. 91. (El texto literal de esta declaración varía bastante de traducción a traducción. Ésta es la versión popular atribuida a Einstein.)
2. Henry Stapp, «S-Matrix Interpretation of Quantum Theory», *Physical Review*, D3, 1971, 1.303.
3. *Ibid.*, pág. 3.
4. *Ibid.*, pág. iv.
5. Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Harper Torchbooks, Nueva York, Harper and Row, 1958, pág. 41.
6. Henry Stapp, «Mind Matter and Quantum Mechanics», sin publicar.
7. Hugh Everett III, «Relative State, Formulation of Quantum Mechanics», *Reviews of Modern Physics*, vol. 29, núm. 3, 1957, págs. 454-462.

EL PAPEL DEL «YO»

1. Niels Bohr, *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge, Inglaterra, Cambridge University Press, 1934, pág. 53.
2. Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Harper Torchbooks, Nueva York, Harper and Row, 1958, pág. 42.
3. Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, Nueva York, Harper and Row, 1974, pág. 75.
4. Erwin Schrödinger, «Image of Matter», en *On Modern Physics*, con W. Heisenberg, M. Born y P. Auger, Nueva York, Clarkson Potter, 1961, pág. 50.

5. Max Born, *Athomic Physics,* Nueva York, Hafner, 1957, pág. 95.
6. *Ibid.,* pág. 96.
7. *Ibid.,* pág. 102.
8. Werner Heisenberg, *Physics and Beyond,* Nueva York, Harper and Row, 1971, pág. 76.
9. Niels Bohr, *Atomic Theory and Human Knowledge,* Nueva York, John Wiley, 1958, pág. 60.
10. Born, *op. cit.,* pág. 97.
11. Heisenberg, *Physics and Philosophy, op. cit.,* pág. 58.

MENTE DE PRINCIPIANTE

1. Shunryu Suzuki, *Zen Mind, Beginner's Mind,* Nueva York, Weatherhill, 1970, págs. 13-14.
2. Henry Miller, «Reflections on Writing», en *Wisdom of the Heart,* Norfolk, Connecticut, New Directions Press, 1941 (reimpreso en *The Creative Process,* por B. Ghiselin, ed.), Berkeley, University of California Press, 1954, pág. 186.
3. Conferencia de Prensa en la KQED Television, San Francisco, California, 3 diciembre de 1965.
4. Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy,* Harper Torchbooks, Harper and Row, 1958, pág. 33.

INSENSATEZ ESPECIAL

1. Albert Einstein, «Aether und Relativitätstheorie», 1920, trad. W. Perret and G. B. Jerffey, *Side Lights on Relativity,* Londres, Methuen, 1922 (reimpreso en *Physical Thought from the Presocratics to the Quantum Physicits,* por Shmuel Sambursky, Nueva York, Pica Press, 1975, pág. 497).
2. *Ibid.,* pág. 497.
3. *Ibid.,* pág. 97.
4. Albert Einstein, «Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie», 1916, trad. W. Perret y G. B. Jeffery, *Side Light on Relativity,* Londres, Methuen, 1922 (reimpreso en *Physical Tought from the Presocratics to the Quantum Physicists,* por Shmuel Samburksky, Nueva York, Pica Press, 1975, pág. 491).
5. Einstein, «Aether und Relativitätstheorie», *op cit.,* pág. 496.
6. J. Terrell, *Physical Review,* 116, 1950, 1.041.
7. Isaac Newton, *Philosophiae Principia Mathematica* (trad. Andrew Motte), reimpreso en *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World* (trad. revisada por Florian Cajori), Berkeley, University of California Press, 1946, pág. 6.
8. De «Space and Time» y dirigido a la 80.ª Reunión de Especialistas alemanes en Ciencias Naturales y Física, Colonia, Alemania, 21 de septiembre de 1908 (reimpreso en *The Principles of Relativity,* por A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski y H. Weyle, Nueva York, Dover, 1952, pág. 75).
9. Albert Einstein y Leopold Infeld, *The Evolution of Physics,* Nueva York, Simon and Schuster, 1961, pág. 197.

INSENSATEZ GENERAL

1. Albert Einstein y Leopold Infeld, *The Evolution of Physics,* Nueva York, Simon and Schuster, 1961, pág. 197.

2. *Ibid.*, pág. 219.
3. *Ibid.*, págs. 33-34.
4. David Finkelstein, «Past-Future Asymetry of the Gravitational Field of a Point Particle», *Physical Review*, 110, 1958, 965.

EL ZOO DE LAS PARTÍCULAS

1. Goethe, *Theory of Colours*, parte II (Histórica), iv, 8 (trad. C. L. Eastlake, Londres, 1841; reimpresa por M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1970).
2. Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, Nueva York, Harper and Row, 1974, pág. 162.
3. Jack Sarfatti, manuscrito sin publicar.
4. Werner Heisenberg, *On Modern Physics*, Nueva York, Clarkson Potter, 1961, pág. 13.
5. David Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics*, Filadelfia, University of Pennsylvania Press, 1957, pág. 90.
6. Werner Heisenberg, *Physics and Beyond*, Nueva York, Harper and Row, 1971, pág. 41.
7. Werner Heisenberg *et al.*, *On Modern Physics, op. cit.*, pág. 34.
8. Victor Guillemin, *The Story of Quantum Mechanics*, Nueva York, Scribner's, 1968, pág. 135.
9. Max Born, *The Restless Universe*, Nueva York, Dover, 1951, pág. 206.
10. *Ibid.*, pág. 206.
11. *Ibid.*, pág. 206.
12. Kenneth Ford, *The World of Elementary Particles*, Nueva York, Blaisdell, 1965, págs. 45-46.

LA DANZA

1. Louis de Broglie, «A General Survey of the Scientific Work of Albert Einstein», en *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, vol. 1, Paul Schilpp (ed.), Harper Torchbooks, Nueva York, Harper and Row, 1949, pág. 114.
2. Richard Feynman, «Mathematical Formulation of the Quantum Theory of Electromagnetic Interaction», en Julian Schwinger (ed.), *Selected Papers on Quantum Electrodynamics* (Apéndice B), Nueva York, Dover, 1958, pág. 272.
3. Kenneth Ford, *The World of Elementary Particles*, Nueva York, Blaisdell, 1963, pág. 208 y cubierta.
4. Sir Charles Eliot, *Japanese Buddhism*, Nueva York, Barnes and Noble, 1969, págs. 109-110.

MÁS QUE AMBOS

1. John von Neumann, *The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (trad. Robert T. Beyer), Princeton, Princeton University Press, 1955.
2. *Ibid.*, pág. 253.
3. Werner Heisenberg, *Physics and Beyond*, Nueva York, Harper and Row, 1971, pág. 206.
4. Max Born, *Atomic Physics*, Nueva York, Hafner, 1957, pág. 97.
5. Transcrito de cintas magnetofónicas grabadas en la Conferencia sobre Física y Consciencia, Big Sur, California, enero 1976.
6. Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen, «Can Quantum-Mechanical

Description of Physical Reality Be Considered Complete?, en *Physical Review*, 47, 1935, págs. 777 y siguientes.

7. Werner Heisenberg, *Across the Frontiers*, Nueva York, Harper and Row, 1974, pág. 72.
8. Cintas magnetofónicas grabadas en Esalen, *op. cit.*
9. Garret Birkhoff y John von Neumann, «The Logic of Quantum Mechanics», *Annals of Mathematics*, vol. 37, 1936 .
10. Cintas magnetofónicas grabadas en Esalen, *op. cit.*

EL FIN DE LA CIENCIA

1. Longchenpa, «The Natural Freedom of Mind», trad. Herbert Guenter, *Crystal Mirror*, vol. 4, 1975, pág. 125.
2. Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen, «Can Quantum-Mechanics Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Physical Review*, 47, 1935, págs. 777 y sigs.
3. Erwin Schrödinger, «Discussions of Probability Relations between Separated Systems», *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 31, 1935, páginas 555-562.
4. Albert Einstein, «Autobiographical Notes», en Paul Schilpp (ed.) *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, Harper and Row, 1949, pág. 85.
5. *Ibid.*, pág. 87.
6. *Ibid.*, pág. 85.
7. Henri Stapp: «S-Matrix interpretation of Quantum Theory», *Physical Review*, 1971, págs. 1.303 y sigs.
8. Stuart Freedman y John Clauser, «Experimental Test of Local Hidden Variable Theories», *Physical Review Letters*, 28, 1972, págs. 938 y sigs.
9. Henry Stapp, «Are Superluminal Connections Necessary?», *Nuovo Cimento*, 40B, 1977, 191.
10. Henry Stapp, «Bell's Theorem and World Process», *Il nuovo Cimento*, 29B, 1975, 271.
11. David Bohm and B. Hiley, «On the Intuitive Understanding of No-locality as Implied by Quantum Theory» (reimpreso por el Birkbeck College, University of London, 1974).
12. Henry Stapp, «S-Matrix Interpretation», *op. cit.*
13. Werner Heisenberg, *Physic and Philosophy*, Harper, Torchbooks. Nueva York, Harper and Row, 1958, pág. 52.
14. Discurso pronunciado el 6 de abril, 1977, en la Universidad de California, en Berkeley.
15. Discurso pronunciado el 6 de abril, 1977, en la Universidad de California, en Berkeley.
16. Discurso pronunciado el 6 de abril 1977 en la Universidad de California, en Berkeley.
17. Discurso pronunciado el 6 de abril 1977 en la Universidad de California, en Berkeley.
18. Victor Guillemin, *The Story of Quantum Mechanics*, Nueva York, Scribner's, 1968, pág. 19.
19. Lord Kelvin (Sir William Thompson», «Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light», *Philosophical Magazine*, 2, 1901, 1-40.
20. Isidor Rabi, «Profiles — Physicist, II», *The New York Magazine*, 20 de octubre de 1975.
21. Henry Stapp, «The Copenhague Interpretation and the Nature of Space-Time», *American Journal of Physics*, 40, 1972, 1.098.
22. Max Planck, *The Philosophy of Physics*, Nueva York, Norton, pág. 83.
23. Esta cita fue hecha en el Fundamental Group Physics, Lawrence Berkeley La-

boratory, 21 de noviembre 1975 (en el curso de un intercambio de impresiones informal) por el doctor F. Capra, colega del doctor Chew.

24. Al Chung-liang Huang, *Embrace Tiger, Return to Mountain,* Moab, Utah, Real People Press, 1973, pág. 14.
25. Transcrito de las cintas grabadas en la Conference de Esalen sobre «Physics and Conciousness», Big Sur, California, enero 1976.

BIBLIOGRAFÍA

Barnett, L., *The Universe and Dr. Einstein,* Nueva York, Harper and Row 1948.

Birkhoff, G., y von Neumann, J., «The Logic of Quantum Mechanics», *Annals of Mathematics,* vol. 37, núm. 4, octubre 1936.

Bohm, D., y Hiley, B., «On the Intuitive Understanding of Nonlocality as Implied by Quantum Theory» (reimpresión, Birkbeck College, Universidad de Londres, 1974).

Bohr, N., *Atomic Theory and the Description of Nature,* Cambridge, Inglaterra, Cambridge University Press, 1934.

Bohr, N., *Atomic Theory and Human Knowledge,* Nueva York, John Wiley, 1958.

Born, M., *Atomic Physic,* Nueva York, Hafner, 1957.

Born, M., *The Restless Universe,* Nueva York, Dover, 1951.

Born, M., y Einstein, A., *The Born-Einstein Letters* (trad. Irene Born), Nueva York, Walker and Company, 1971.

Capra, F., *Chronology of the Development of Quantum Mechanics,* manuscrito sin publicar preparado por el Dr. J. Sarfatti, para el Physics/Conciousness Research Group.

Capra, F., *The Tao of Physics,* Berkeley, Shambala, 1975.

De Broglie, L., «A General Survey of the Scientif Work of Albert Einstein», en Schilpp, P. (ed.) *Albert Einstein Philosopher-Scientist,* vol. 1, Nueva York, Harper and Row, 1949, pág. 114.

De Witt, and Graham, N., *The Many Worlds Interpretations of Quantum Mechanics,* Princeton, Princeton University Press.

Eddington, A., *The Mathematical Theory of Relativity,* Cambridge, Inglaterra, Cambridge University Press, 1923.

Eddington, A., *Space, Time and Gravitation,* Cambridge, Inglaterra, Cambridge University Press, 1920.

Einstein, A., «Aether und Relativitätstheorie», 1920 (trad. Perret, W., and Jeffery, G., *Side Lights on Relativity,* Londres, Methuen, 1922).

Einstein, A., «Autobiographical Notes» en Schilpp, P. (ed.) *Albert Einstein, Philosopher-Scientist,* vol. 1, Nueva York, Harper and Row, 1959, pág. 1 y siguientes.

Einstein, A., «Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie», 1916 (trad. Perret, W., y Jeffrey, G., *Side Lights on Relativity,* Londres, Methuen, 1922).

Einstein, A., «On Physical Reality», *Franklin Institute Journal,* 221, 1936, págs. 349 y siguientes.

Einstein, A., e Infield, L., *The Evolution of Physics,* Nueva York, Simon Schuster, 1961.

Einstein, A.; Podolsky, B., y Rosen, Nathan, «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Physical Review,* 47, 1935, página 777.

Eliot, C., *Japanese Buddhism,* Nueva York, Barnes and Noble, 1969.

Feynman, R., «Mathematical Formulation of the Quantum Theory of Electromag-

netic Interaction», en Schwinger, J. (ed), *Selected Papers of Quantum Electrodynamics,* Nueva York, Dover, 1958, págs. 272 y sigs.
Finkelstein, D., «Beneath Time», manuscrito sin publicar.
Finkelstein, D., «Past-Future Asymmetrie of the Gravitational Field of a Poin Particle», *Physical Review,* 110, 1958, 965.
Ford, K., *The World of Elementary Particles,* Nueva York, Blaisdell, 1963.
Freedman, S., and Clauser, J., «Experimental Test of Local Hidden Variable Theories», *Physical Review Letters,* 28, 1972, 938.
Goethe, *Theory of Colours* (trad. Eastlake, C. L.), Londres, 1840: reimpreso por M. I. T. Press, Cambridge, Massachussetts, Estados Unidos.
Guillemin, V., *The Story of Quantum Mechanics,* Nueva York, Scribner's, 1968.
Hafele, J., y Keating, R., *Science,* vol. 177, 1972.
Hawking, S. W., «Singularities in the Geometry of Space-time», Adams Prize, Universidad de Cambridge, 1966.
Heisenberg, W., *Across the Frontiers,* Nueva York, Harper and Row, 1974.
Heisenberg, W., *Physics and Beyond,* Nueva York, Harper and Row, 1971.
Heisenberg, W., *Physics and Philosophy,* Nueva York, Harper and Row, 1958.
Heisenberg, W., *et al., On Modern Physics,* Nueva York, Clarkson Potter, 1961.
Herbert, N., «More than Both: A key to Quantum Logic», manuscrito sin publicar (puede conseguirse en el C-Life Institute, Box, 261, Boulder Creek, California, 95006).
Herbert, N., «Thru the looking Glass: Alice's Analysis of Quantum Logic», manuscrito sin publicar (puede conseguirse en el C-Life Institute, Box 261, Boulder Creek, California, 95006).
Herbert, N., «Where do Parts Come From?», manuscrito sin publicar (puede conseguirse en la misma dirección que el anterior).
Huang, A., *Embrace Tiger, Return to Mountain,* Moab, Utah, Real People Press, 1969.
Jung, G. *Collected Works,* vol. 9 (Bollingen Series XX), Princeton, Princeton University Press, 1969.
Jung, C., y Pauli, W., *The Interpretation of Nature and the Psyche* (Bollingen Series LI), Princeton, Princeton University Press, 1955.
Kelvin, Lord (Sir William Thompson), «Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light», *Philosophical Magazine,* 2, 1901, I-40.
Longchenpa, «The Natural Freedom of Mind», trad. Guenther, H., en *Crystal Mirror,* vol. 4, 1975, pág. 125.
Lorentz, A., *et al., The Principle of Relativity,* Nueva York, Dover, 1952.
Miller, H., «Reflections on Writing», *Wisdom of the Heart,* Norfolk, Conn., New Directions, 1941. Reimpreso en Ghiselind (ed.), *The Creative Process,* Berkeley, University of California Press, 1954.
Murchie, G., *Music of the Spheres,* vols. 1 y 2, Nueva York, Dover, 1961.
Newton, I., *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (trad. Andrew Motte), reimpreso en *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World* (edición revisada Florian Cajori), Berkeley, University of California Press, 1946.
Oppenheimer, J. R., y Snyder, H., «On Continual Gravitational Contraction», *Physical Review,* 56, 1939, 455-459.
Ornstein, R. (ed.), *The Nature of Human Consciousness,* Nueva York, Viking, 1974.
Penrose, R., «Gravitational Collapse and Space-time Singularities», *Physical Review Letters,* 14, 1965, 57-59.
Planck, M., *The Philosophy of Physics,* Nueva York, Norton, 1936.
Rabi, I., «Profiles-Physicists, II», *The Newyorker Magazine,* 20 de octubre 1975.
Russell, B., *The ABC of Relativity,* Londres, George Allen and Unwin, 1958.
Sambursky, S., *Physical Thougt from the Presocratics to the Quantum Physicists,* Nueva York, Pica, 1975.
Sarfatti, J., «The Case for Superluminal Information Transfer», *M. I. T. Technology Review,* vol. 79, núm. 5, 1977, págs. 3 y sigs.

Sarfatti, J., «Mind, Matter and Einstein», manuscrito sin publicar.
Sarfatti, J., «The Physical Roots of Consciousness», en Mishlove, J. *The Roots of Consciousness,* Nueva York, Random House, 1975, págs. 279 y sigs.
Sarfatti, J., «Reply to Bohm-Hiley», *Psychoenergetic Systems,* Londres, Gordon and Breach, vol. 2, 1976, págs. 1-8.
Schilpp, P., *Albert Einstein Philosopher-Scientist,* Nueva York, Harper and Row, 1949.
Schrödinger, E., «Discusion Probability Relations Between Separated Systems», *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society,* vol. 31, 1935.
Schrödinger, E., «Image of Matter», en Heisenberg, W., *On Modern Physics,* Nueva York, Clarkson Potter, 1961, págs. 50 y sigs.
Shamos, M. (ed.), *Great Experiments in Physics,* Nueva York, Holt-Dryden, 1959.
Stapp, H., «Are Superluminal Connections Necessary?», *Nuovo Cimento,* 40B, 1977, 191.
Stapp, H., «Bell's Theorem and World Process», *Nuovo Cimento,* 29B, 1975, 270.
Stapp, H., «The Copenhaguen Interpretation and the Nature of Space-time». *American Journal of Physics,* 40, 1972, 1.098.
Stapp, H., «S-Matrix Interpretation of Quantum Theory», *Physical Review,* D3, 1971, 1.303.
Stapp, H., «Theory of Reality», *Foundations of Physics,* 7, 1977, 133.
Suziki, S., *Zen Mind, Beginner's Mind,* Nueva York, Weatherhill, 1970.
Targ, R., y Putthoff, H., *Mind-Reach,* Nueva York, Delacorte Press, 1977.
Taylor, J., *Black Holes: The End of the Universe?,* Nueva York, Random House, 1973.
Terrell, J., *Physical Review,* 116, 1959, 1.041.
Von Neumann, J., *The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (trad. Beyer), R. Princeton University Press, Princeton, 1955.
Walker, E., «The Nature of Consciousness», *Mathematical Biosciences,* 7, 1970.
Weisskopf, V., *Physics in the Twentieth Century,* Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
Weizenbaum, J., *Computer Power and Human Reason,* San Francisco, Freeman, 1976.
Witten (ed.), *Gravitation: A Introduction to Current Research,* Nueva York, Wiley, 1962.
Wheeler, J., *et al., Gravitation,* San Francisco, Freeman, 1973.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

¿WU LI?

UNA GRAN SEMANA EN GRAN SUR

Física (25), Esalen (26), chino (27), Maestros de Wu Li (28), científicos y técnicos (31), el espectro del sodio (32), el modelo de átomo de Bohr (34).

A EINSTEIN NO LE GUSTA

La Nueva Física y la antigua física (39), la física de Newton (40), la Gran Máquina (43), ¿creamos realidades? (48), el mito de la objetividad (50), «partículas» subatómicas (51), estadísticas (52), la teoría cinética de los gases (52), probabilidad (54), la Interpretación de Copenhague de la Mecánica Cuántica (56), pragmatismo (57), análisis de la división cerebral (58), sumario de la nueva física y la antigua física (59).

MODELOS DE ENERGÍA ORGÁNICA

(MECÁNICA CUÁNTICA)

¿ENTES VIVOS?

Orgánico e inórganico (61), Max Planck (63), «discontinuos» (64), radiación de los cuerpos-negros (65), la constante de Planck (66), Albert Ein-

stein (68), teoría einsteniana del efecto fotoeléctrico (68), ondas, longitudes de onda, frecuencias y amplitudes (70), difracción (74), el experimento de Young de la doble rendija (75), el dualismo onda-partícula (77), ondas de probabilidad (80).

LO QUE SUCEDE

El proceso de la mecánica cuántica (83), la región de los preparativos (84), la región de la medida (84), el sistema observado (85), la ecuación de onda de Schrödinger (85), los observables (86), las partículas como «correlaciones» (86), funciones de la onda (88), funciones de posibilidad (88), saltos del quanto (90), la Teoría de la Medida (92), la metafísica de la mecánica cuántica (94), la Interpretación de los Mundos Múltiples de la Mecánica cuántica (98), el gato de Schrödinger (99), el Incrédulo Tomás (101).

MI SENDA

EL PAPEL DEL «YO»

La ilusión del «dentro o fuera» (103), complementariedad (104), la dispersión de Compton (105), Louis de Broglie (107), las ondas de materia (108), las ondas estacionarias (111), la ecuación de onda de Schrödinger (de nuevo) (111), el principio de exclusión de Pauli (115), Max Born (116), ondas de probabilidad (de nuevo) (116), el modelo cuántico del átomo (118), Werner Heisenberg (120), la Matriz S (120), el Principio de la Incertidumbre de Heisenberg (121), cambio de tornas (124).

INSENSATEZ

MENTE DE PRINCIPIANTE

Insensatez (127), la mente de principiante (128), la teoría especial de la relatividad (130), el principio de la relatividad de Galileo (132), sistemas de coordenadas inerciales (132), las transformaciones galileanas (134), la

constancia de la velocidad de la luz (136), el éter (138), el experimento de Michelson-Morley (138), las contracciones de FitzGerald (140), las transformaciones de Lorentz (141).

INSENSATEZ ESPECIAL

La teoría especial de la relatividad (143), longitud y tiempo «propio» y «relativo» (147), la explicación rotativa de la contracción relativista de Terrell (150), incremento relativo de la masa (152), simultaneidad (154), el continuo espacio-tiempo (156), el intervalo espacio-tiempo (160), Hermann Minkowski (162), masa-energía (163), leyes de la conservación (164).

INSENSATEZ GENERAL

Gravedad y aceleración (167), dentro y fuera del ascensor (169) masa gravitatoria y masa inercial (170), la geografía del continuo espacio-tiempo (174), geometría euclidiana (176), los círculos de revolución (178), la geometría no-euclidiana (180), la definitiva visión de Einstein (183), el perihelio de Mercurio (185), la desviación de la luz estelar (186), Agujeros Negros (188), la ilusión de «fuerza» (191), la ilusión de la insensatez (191).

ME AFERRO A MIS IDEAS

EL ZOO DE LAS PARTÍCULAS

Las barreras del cambio (193), la sala de los espejos (195), la nueva perspectiva del mundo (196), la física de las partículas (196), cámaras de burbujas (197), la danza de la creación y el aniquilamiento (198), ¿qué hacen las huellas? (199), teoría cuántica de campos (200), partículas y masa (203), las partículas sin masa (206), carga (207), espín (207), momento angular (208), números cuánticos (209), antipartículas (210).

LA DANZA

Diagramas espacio-tiempo (213), los diagramas de Feynman (215), el baile de la creación y el aniquilamiento (de nuevo) (216), anti-partículas (de

nuevo) (217), la ilusión del tiempo (219), entropía (222), los fotones virtuales (223), la fuerza electromagnética (225), Hideki Yukawa (227), interacción fuerte (227) mesones virtuales (228), autointeracciones (229), gravedad (234), la fuerza débil (234), fotones virtuales (de nuevo) (235), los diagramas del vacío (239), las leyes de conservación (241), simetrías (243), la matriz S (de nuevo) (244).

ILUMINACIÓN

MÁS QUE AMBOS

Física e iluminación (251), el teorema de Bell y la lógica cuántica (252), la descripción de una función de onda (253), «proyecciones como proposiciones» (254), David Finkelstein (256), símbolos y experiencia (256), logos y mitos (257), la ley distributiva (258), la polarización de la luz (259), la paradoja del tercer polarizador (263), superposiciones (265), la lógica cuántica (267), tablas de transición (268), diagrama reticular (270), contraprueba de Neumann de la ley distributiva (271).

EL FIN DE LA CIENCIA

Iluminación y unidad (277), J. S. Bell (278), el quanto y sus conexiones (278), el experimento de Einstein-Podolsky-Rosen (281), comunicación superlumínica (283), el principio de las causas locales (284), el teorema de Bell (285), el experimento Freedman-Clauser (289), Jack Sarfatti (289), la teoría de la transmisión superlumínica de la negentropía (289), el experimento de Aspect (291), comunicación superlumínica sin señales (293), falla la localización (294), determinismo contrafactual (297), superdeterminismo (297), la teoría de los Mundos Múltiples (de nuevo) (298), resumen (299), la filosofía de la mecánica cuántica (301), David Bohm (302), un «todo inseparable» (302), el «orden implicado» (303), el nuevo instrumento del pensamiento (304), religiones orientales (306), Kali (308), la Senda sin Forma (309) la danza en círculo (310).

ÍNDICE ALFABÉTICO

A

Absorción de energía, 67, 68.
Aceleración, 166, 171, 173, 174.
Aceleración y gravedad, 166, 169, 173, 181, 183.
Aceleración negativa, 173.
Aceleración positiva, 173.
Acelerador de partículas, 197, 198, 204.
Admisiones, 268.
Alfeón, 264.
Alta energía, Fotones de, 69.
Alta energía, Fotones visuales de, 223.
Alta frecuencia, Luz de, 72
Amplitud, 88.
Anderson, Carl, 210.
Antimuón, 295.
Antipartícula, 210, 211, 219.
Antiprotón, 236.
Aristóteles, 42, 254.
Aspect, Alan, 291, 293.
Átomos, 32-35, 40, 41, 53, 54, 64, 65, 110, 113-116, 118, 119, 163, 195.
Átomos, estado fundamental de los, 34, 55.
Átomos, teoría de Bohr sobre los, 34, 35, 36.
Augurios de inocencia, 157.
Avatamsaka Sutra, 239.

B

Barión, 205, 210, 242.
Bell, J. S., 84, 278.
Bell, Teorema de, 16, 252, 278, 285, 286, 288, 289, 294, 295, 296, 299.

Birkbeck College, 267.
Birkhoff, Garrett, 258, 274.
Blake, William, 157.
Blofeld, John, 238.
Bohm, David, 199, 281, 291, 294, 303, 304, 305.
Bohr, Einstein y, 16, 56, 257.
Bohr, Niels, 16, 17, 34, 36, 46, 56, 57, 67, 68, 80, 104, 107, 109, 115, 116, 117, 123, 202, 209, 255, 281.
Bohr, Teoría de los átomos, 55, 111, 113, 114, 115, 118, 201.
Boltzmann, Constante de, 68.
Born, Max, 84, 116, 117, 118, 124, 208, 209, 255.
Boyle, ley de, 52, 53.
Budismo, 184, 238, 240, 308.
Budismo mahayana, 238, 242.
Budismo tántrico, 308.
Budismo Zen, 128, 206.

C

Cálculo lógico, 254.
Campo electromagnético, 143, 144.
Catástrofe ultravioleta, 65.
Causas locales, Principio de las, 284, 288, 294, 297, 299, 300.
Célula, 195.
CERN, 278.
Cisne X-1, 190.
Clauser-Freedman, Experimento de, 289, 290, 296, 299.
Colapso de la función de onda, 90, 97, 98, 99, 100, 295.
Color, La Constante de Planck y el, 67.
Complementariedad, 104, 106, 107.
Compton, Arthur, 105, 106.
Compton, Dispersión de, 105, 106.
Comunicación superlumínica, 289.
Confucio, 158.
Consciencia, Física y, 94.
Conservación, Leyes de, 164, 196, 241-243.
Conservación de masa-energía, Leyes de, 164, 165, 224, 230, 234, 235, 241, 242.
Constante de Planck, 66.
Constante de proporcionalidad, 72.
Continuo cuadrimensional, espacio-tiempo, 157.
Copérnico, Nicolaus, 103, 139, 140, 193.
Correlación, 86, 87.

Cuántica de campos, Teoría, 200, 201.
Cuarta dimensión, 157.
Chew, profesor G. F., 309.

D

Davisson, Clinton, 108.
Davisson-Germer, Experimento de, 108, 110.
De Broglie, Ecuación de, 108, 110, 117, 209.
De Broglie, Louis, 107, 110, 111, 113, 115, 117, 118, 120, 221.
Desaceleración, 166, 173.
Descartes, René, 32, 43, 44, 135.
Desviación de la luz estelar, 187.
Detectores de fotones, 89, 90, 91, 92, 93, 97. Véase también «tubos fotomultiplicadores».
Determinismo, 83, 89, 116.
Determinismo contrafactual, 297, 299, 300.
Diagramas de espacio-tiempo, 162, 215, 219.
Diagramas de vacío, 240.
Dirac, Paul, 104, 200, 210, 215, 226, 236.
Distributiva, ley, 258, 273.
Doblete, 270.
Dopler, Efecto, 137.
Dylan, Bob, 129.

E

Eddington, Arthur, 175, 176, 177.
Efecto fotoeléctrico, 68, 72, 77, 78, 105, 106, 107.
Einstein, Bohr y, 16, 56.
Einstein, Ecuaciones de, 108.
Einstein, Intervalo espacio-tiempo y, 156, 157.
Einstein y Planck, 68.
Einstein-Podolsky-Rosen, Efecto de, 281, 282, 283, 284, 288, 290.
Einstein, Principio de constancia de la velocidad de la luz y, 144, 145, 146, 155, 290.
Einstein, Relación masa-energía y, 131, 163, 164, 165, 172.

Einstein, Reposo absoluto y, 135, 136, 144, 145, 171.
Einstein-Rosen, Puentes de, 190.
Einstein, Teorema de Pitágoras y, 158, 159.
Electrodinámica cuántica, 226.
Electrón, 32, 33, 34, 35, 41, 51, 55, 64, 69, 108, 112, 114, 115, 116, 118, 119, 122, 219, 220, 221, 225, 229, 243.
Electrón, Difracción del, 108, 109.
Electrón, Desviación del, 68.
Electrón, Masa del, 204.
Electrón, Nube del, 119.
Electronvoltio, 204.
Emisión de energía, 68.
Emisiones, 268.
Energía, 52, 55, 65, 67, 68, 72, 78, 81, 105, 106, 107, 131, 152, 163, 164, 165, 166, 172.
Energía estelar, 163.
Energía termal, 34, 165.
Entropía, 222.
Espacio, Mapas del, 213, 214, 215.
Espacio quatridimensional, 157.
Espacio, Tiempo y, 37, 57, 58, 87, 131, 145, 158, 161, 162.
Espacio-tiempo, Continuo del, 157, 158, 174, 176, 178, 181, 182, 184.
Espacio-tiempo, Diagramas del, 162, 215, 219.
Espacio-tiempo, Intervalo, 160, 161, 162, 166.
Espacio-tiempo, Representaciones del, 161.
Espectro del hidrógeno, 55.
Espectro de la luz blanca, 35, 55.
Espectro del sodio, 32.
Espín, 207, 208, 209, 279, 280, 282.
Estadísticas, 52, 54, 117.
Estructura discontinua de la naturaleza, 64.
Eta, partículas, 233.
Euclidiana, Geometría, 167, 168, 176, 275.
Everett, Hug, 97, 98, 99.
Experiencia y símbolos, 256, 257, 258, 266.
Experimento de la doble-rendija, de Young, 75, 76, 78, 107, 110.

F

Fenómenos síquicos, 296.
Feynman, Diagramas de, 215, 216, 218, 219.
Feynman, Richard, 215, 219, 236.

Feynman, Teoría de la perturbación, 223.
Filkelstein, David, 18, 26, 188, 189, 198, 244, 252, 258, 264, 265, 274, 275, 310.
Finnegan's Wake, 243.
Física clásica, 17, 64, 65, 86, 92, 99, 101, 108, 123, 152, 256.
Física cuántica, 16, 19, 21, 41, 63, 72, 84, 91, 92, 96, 97, 100, 101, 107, 122, 166, 252.
Física, Energía orgánica y, 61.
Física pre-relativista, 137.
Física relativista, 15.
Física teórica, 20.
Física subatómica, 95.
Fisión, 164.
Fitzgerald, Georges Francis, 140, 141, 146, 147.
Ford, Kenneth, 203, 236.
Fotoeléctrico, Efecto, 68, 72, 77, 78, 105, 106, 107.
Fotomultiplicadores, Tubos, 286-287, 288, 289.
Fotones, 55, 68, 69, 77, 78, 79, 80, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 101, 111, 137, 219, 220, 221, 225, 243.
Fotones de alta energía, 69, 72.
Fotones de baja energía, 69 72.
Fotones, Detectores de, 89, 90, 91, 92, 93, 97 (véase además «tubos fotomultiplicadores»).
Fotones «orgánicos», 78.
Fotones virtuales, 223, 225, 226, 228, 229, 230, 235, 236.
Frecuencia y Energía, 72, 106.
Freedman, Stuart, 289, 290, 296, 299.
Freud, Sigmund, 59.
Fuerza, 152, 171.
Fuerza electromagnética, 207, 225, 234.
Función de onda, 88-96, 253-256, 265-266.
Función de onda, colapso de, 89-91, 99, 295.
Función de onda, mecánica cuántica y, 94-96, 117.
Fusión, 164.

G

Galilei, Galileo, 32, 43, 44, 49, 118, 132, 134, 135, 145, 307.
Galileo, Principio de la relatividad, 132, 133, 146.
Gamma, rayos, 122.
Gauge, 252.
Geometría, 167, 168, 176, 177.

Geometría analítica, 301.
Geometría euclidiana, 168, 176, 177, 178, 179, 275.
Geometría, Leyes de la, 168.
Germer, Lester, 108.
Goethe, Johann Wolfgang von, 193.
Graham, Neill, 97, 98.
Gran Máquina, Idea de la, 43, 44, 46, 49, 138, 297.
Gravitación, Campos de, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 183.
Gravitación, Leyes de Newton de la, 43, 44.
Gravitación, Masa de, 173.
Guillemin, Victor, 66.

H

Hafele, J. C., 150.
Hagedorn, Teoría de, 222.
Hamilton, W. R., 120.
Hawking, S. W., 189.
Heinsenberg, Microscopios de, 292.
Heisenberg, Principio de incertidumbre de, 47, 121, 122, 123, 124, 209, 224. 229, 235, 241, 245, 309.
Heisenberg Werner, 16, 23, 41, 80, 92, 109, 120, 121, 122, 124, 129, 202, 203, 254, 257, 281.
Helio, 163, 164.
Herbert, Nick, 239.
Hidrógeno, 32-35, 55, 114, 163, 164.
Hidrógeno, espectro del, 33, 34, 35, 55, 68.
Huan Yen, Sutra, 239.
Huang, 15, 26, 28, 30, 310.

I

Interacción débil, 234, 241.
Interacción electromagnética, 241.
Interacción fuerte, 227, 228, 229, 234, 241.
Interacción gravitatoria, 241.
Interferómetros, 140, 141, 146.

Interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, 56, 57, 58, 59, 84, 94, 96, 97, 99, 100, 101, 281, 300.

J

James, William, 57.
Josephson, Brian, 239, 249.
Jung, Carl, 50, 51, 78.

K

Kali, 307, 308.
Kaón, 249, 295.
Koán, 206.
Keating, R. E., 150.
Kelvin, Lord, 307.
Kramer, H. A., 80, 117.
Krishna, 103.

L

La Place, Pierre-Simon, 188.
LBL (véase Lawrence Berkeley Laboratory).
Lambda, Partículas, 198, 217, 244, 249.
Lawrence Berkeley Laboratory, 19, 57, 205, 213, 289, 299, 305.
Lenard, Philippe, 68.
Leptón, 205, 209.
Ley distributiva, 258, 273.
Leyes de Conservación, 164, 196, 241-243.
Leyes de conservación de masa-energía, 164, 165, 224, 230, 234, 235, 241, 242.
Lobachevsky, Nikolai Ivanovich, 167.
Lógica clásica, 258, 264, 267, 271, 274.

Lógica cuántica, 252, 255, 258, 274.
Longchenpa, 277.
Longitud propia, 147, 149.
Longitud relativa, 147, 149.
Lorentz, Hendrik Antoon, 141, 146, 156.
Lorentz, Transformaciones de, 141, 147, 151, 154.
Lunares, Sondas, 45.
Lutero, Martin, 43.
Luz, 77, 79, 94, 104, 106, 107, 139, 151, 154, 162, 172.
Luz de alta frecuencia, 65, 67, 72.
Luz de baja frecuencia, 65, 67, 72.
Luz, Energía y, 122, 172.
Luz, experimento de doble-rendija y la, 76, 77, 78, 79, 83, 84, 85, 89, 91, 97, 105, 106, 113, 278, 292.
Luz, experimento de Michelson-Morley, 138-146, 155, 293, 307.
Luz, como fenómeno corpuscular, 50/68, 69, 74, 80, 81, 106, 107.
Luz, como fenómeno ondulatorio, 50/69, 81, 106, 107, 129, 137.
Luz, Gravedad y, 185, 186, 187.
Luz, Medida de la velocidad de la, 146, 147.
Luz, Polarización de la, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 268, 269, 273.
Luz, Principio de constancia de la velocidad de la, 141, 144, 145, 147.
Luz roja, 65, 67, 69.
Luz, Teoría de los quantos de, 67, 129.
Luz, Velocidad de la, 68, 71, 131, 136, 137, 138, 141, 144, 146, 147, 152, 153, 154, 155, 163.
Luz verde, 67, 69.
Luz violeta, 67, 68, 69, 72.

M

Macroscópico, Mundo de lo, 83, 108, 131, 286.
Macroscópicos objetos, 87.
Mapas espaciales, 213.
Mapas espacio-tiempo, 213, 215.
Marcos de referencia (véase sistemas de referencia), 132, 133, 134, 135, 146, 166.
Masa, 184, 203.
Masa cero, 206.
Masa en reposo, 153, 204, 205.
Masa del electrón, 205.
Masa, Energía y, 52, 131, 163, 172.
Masa gravitatoria, 173, 174.
Masa inercial, 173, 174.

Masa relativista, 204, 205.
Masa, Velocidad y, 130, 152, 153.
Masa-energía, Dualismo, 163, 164, 165, 198, 205.
Masa-energía, Ley de conservación de, 164, 165, 224, 230, 234, 235, 241, 242.
Matemáticas, 37, 85, 92, 110, 118, 121.
Matemáticas, Física y, 25, 37.
Matemáticas, Partículas subatómicas y, 257, 258.
Materia, Campos y, 201.
Materia inorgánica, 62, 63.
Matería, Ondas de la, 108, 111, 113, 114, 115, 117.
Materia orgánica, 62, 63.
Materia, Teoría atómica de la, 68.
Materialismo, 94, 95.
Matriz S, 115, 120, 121, 201, 244, 245, 246, 247, 248, 249.
Maxwell, Ecuaciones, 143.
Maxwell, Teoría de, 129, 131.
Mecánica clásica, 143, 144.
Mecánica, Leyes de la, 132, 133, 134, 135, 136, 138, 145, 169, 170, 180.
Mecánica matricial, 120.
Mecánica ondulatoria, 72, 76, 116, 117, 120.
Medición, Problemas de la, 94, 96, 98.
Medición, Teoría de la, 93, 94, 302.
Membrana de una sola dirección, 188, 189.
Mercurio, Perihelio de, 185, 186.
Mesón, 205, 210, 211, 228, 230-233.
Mesón K, 198, 217.
Mesón Pi, 197, 217.
Metafísica, Física y, 97, 101.
Microscopios de Heisenberg, 292.
Michelson-Morley, Experimento de, 137-146, 155, 293, 307.
Miller, Henry, 128.
Minkowski, Espacio-tiempo de, 162.
Moléculas, 53, 195.
Momento, 46, 47, 89, 121-124, 202, 242.
Movimiento, 42-47, 131-136, 138-141, 146, 147, 161, 166, 168-174.
Movimiento absoluto, 132, 135, 144, 145, 171.
Movimiento de las partículas subatómicas, 121, 123, 124.
Muones, 149, 228.
Murchie, Guy, 161.
Murphy, Michael, 26.
Música de las esferas (Murchie), 161.

N

Natural, Filosofía, 48.
Naturaleza, Estructura discontinua de la, 64.
Negentropía, 222, 290.
Neutrinos, 295.
Neutrón, 32, 164, 230-233.
Newton, Las estadísticas y, 53.
Newton, Física de, 40-59, 64, 81, 110, 120, 152, 156, 158, 165, 166, 202.
Newton, Ley de la gravedad, 133, 169.
Newton, Leyes del movimiento, 41, 42, 45, 79, 123, 173.
Newton, Sir Isaac, 16, 21, 31, 32, 40, 42, 43, 44, 45, 48, 52, 66, 138, 152, 156, 196.
Nivel de energía de los electrones, 114, 115.
Nobel, Premio, 34, 51, 68, 109, 129.
Nodos, 112, 113.
No-ser, Ser y, 304.
Núcleo del átomo, 32-35, 51.
Nucleones, 228-233.
Números cuánticos, 210.

O

Observables, 85, 86, 121, 188.
Onda, Ecuación de, 97, 137.
Onda, Función de, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 115, 118, 119, 253, 254, 255.
Ondas, Amplitud de las, 70, 117.
Ondas, Electrones y, 112, 113.
Ondas estacionarias, 111-116, 118, 119.
Ondas, Frecuencia de las, 71.
Ondas, Longitud de las, 70, 71, 72, 74, 75, 108, 110, 122, 187, 188.
Ondas electromagnéticas, 71, 129.
Ondas de la materia, 108.
Ondas y partículas, 78, 79, 80, 81, 104, 107, 110, 129.
Ondas de radio, 70, 71.
Ondas, Velocidad de las, 71.

Ontología, 255.
Oppenheimer, J. R., 188.
Optiks (de Newton), 31.
Osciladores atómicos, 66.

P

Paquetes de energía, 66
Partículas, Aceleradores de, 197, 198, 204.
Partículas, Budismo y, 237, 240, 275, 307-310.
Partículas, Dinámica conceptual de la física de las, 278.
Partículas Eta, 233.
Partículas Lambda, 198, 217, 249.
Partículas subatómicas, 63, 87, 101, 104, 105, 108, 110, 149, 153, 164, 165, 195, 198, 199, 203, 205, 206, 218, 223.
Partículas Tau, 205.
Pauli, Principio de Exclusión de, 115, 225.
Pauli, Wolfgang, 51, 115, 225.
Penrose, Roger, 188, 189.
Pion, 149, 228, 229, 230, 231, 232, 295.
Pitágoras, Teorema de, 159, 161, 162.
Planck y Bohr, 209.
Planck, Constante de, 66, 68, 72, 209.
Planck, Ecuación de, 108.
Planck y Einstein, 108.
Planck, Max, 63, 65, 66, 67, 69, 72, 81, 106, 107, 118, 122, 136, 194, 207, 291.
Planck y la mecánica cuántica, 64, 68, 72.
Planck, Partículas subatómicas, 108.
Platón, 150, 152.
Podolsky, Boris, 12.
Polarizadores, 259.
Positrón, 210, 219, 220, 221, 243.
Pragmatismo, 57, 87.
Praynaparamita, Sutras, 240.
Presión del volumen de los gases, 52, 53.
Price, Dick, 26.
Principio de las causas locales, 284, 288, 294, 297, 299, 300.
Principio de Equivalencia, 174.
Probabilidad, La mecánica cuántica y la, 47, 83, 88.
Probabilidad, Ondas de, 80, 81, 116.
Problemas de la medición, 94, 96, 98.
Proporcionalidad, Constante de, 72.

Protón, 32, 33, 41, 116, 149, 197, 217, 226, 228, 229, 230, 231, 232, 233.
Ptolomeo, Astronomía de, 197.

Q

Quanto, Definición del, 39, 40.
Quanto, Paradoja básica del, 202.
Quanto, Teoría del, 17, 21, 40, 41, 47, 54, 56, 57, 66, 78, 80, 83, 84, 85, 89, 96, 115, 123, 143, 202, 225, 281, 284.
Quanto, Topología del, 274, 310.
Quanto, Salto del, 90, 94, 114, 116, 309.
Quantos, Energía y, 105, 106.
Quarks, 243, 244.
Quasars, 190, 191.

R

Rabi, Isidor, 30, 31, 307.
Radiación cósmica, 149.
Radiación de los cuerpos negros, 65, 107, 209, 307.
Radiación electromagnética, 64, 71, 106, 145, 190.
Radio, 54.
Radio, Ondas de, 70.
Rauscher, Doctora Elizabeth, 299.
Rayos X, 70, 71, 105, 106.
Rayos gamma y electrones, 122.
Reacción en cadena, 164.
Reactores atómicos, 164.
Realidad, Mecánica cuántica y, 49, 50, 306, 307, 308, 309.
Referencia, Marcos de referencia (véase sistemas de referencia).
Refracción, Índice de, 136.
Relatividad, 21, 37, 103, 131, 135, 143.
Relatividad, Astronomía y, 185, 186.
Relatividad, Intervalo espacio-tiempo, 161.
Relatividad y literatura oriental, 103.
Relatividad, Principio de equivalencia, 170-173.
Relatividad, Principio de Galileo y, 145, 147.

Relatividad, Teorema de Pitágoras y, 159, 161, 162.
Relatividad, Teoría de los agujeros negros y, 188, 189, 190, 191.
Relatividad, Teoría especial de la, 21, 29, 52, 68, 71, 130, 131, 132, 141, 143, 144, 145, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 155, 157, 158, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 168, 170, 174, 282.
Relatividad, Teoría general de la, 21, 29, 44, 99, 130, 150, 166, 167, 168, 173, 174, 175, 184, 185, 186, 188, 201.
Religiones occidentales, 102, 307.
Religiones orientales, 305, 307.
Reposo absoluto, 135, 136, 138, 144, 145, 171.
Reposo, Masa en, 153, 204-205.
Riemann, Georg Friedrich, 167.
Rosen, Nathan, 281, 282, 284, 286, 288.
Roshi, Backer, 128.
Roshi, Suzuki, 128.
Russell, Bertrand, 110, 175.
Rutherford, Ernest, 33.

S

Sabiduría y conocimiento, 300.
Salto del quanto, 90, 94, 114, 116, 309.
Sarfatti, Jack, 26, 239, 289, 290, 292, 293, 294.
Schlipp, Paul, 235.
Schröndiger, Ecuación de onda de, 85, 87, 89, 90, 92, 93, 95, 97, 114, 115, 116, 117, 118, 121, 254, 265.
Schrödinger, Erwin, 23, 111, 112, 113, 114, 115, 120, 253.
Schrödinger, El gato de, 99, 100.
Ser y No-ser, 304.
Shiva, 218.
Símbolos, Experiencia y, 256, 257, 258, 266.
Simetría, 165, 243.
Simetría, Leyes de, 165.
Sincronismo, 78, 290, 293.
Sistema de dos partículas, 279, 280, 281, 282.
Sistemas de referencia, 32, 133, 134, 135, 138, 144, 145, 154, 156, 157, 161, 162, 166, 168, 169, 170, 173, 174, 179.
Sistemas inerciales, 169, 170, 171, 173, 180.
SLAC: Stanford Linear Accelerator Center, 205.
Slater, John, 80, 117.
Sodio, 32, 62.

Sol, 44, 103.
Solitones, 252.
Sommerfield, Arnold, 33.
Sonido, Ondas del, 282.
Sonido, Velocidad del, 155, 182.
Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), 205.
Stapp, Henry Pierce, 57, 78, 86, 87, 94, 95, 96, 285, 291, 299, 300, 307.
Stern-Gerlach, Instrumento de, 280, 281, 282, 284.
Subatómicos, Fenómenos, 40, 51, 52, 54, 56, 57, 83, 101, 116, 120, 211.
Superdeterminismo, 297.
Superlumínica, Teoría de la transferencia de información, 289.
Superposición coherente, 265.
Sutras, 237, 240.

T

Tai Chi, 6, 28, 310.
Tantra, 199, 308, 309.
Tántrico, Budismo, 199, 308, 309.
Taoísmo, 184, 238.
Taquiones, 289, 290.
Tau, partículas, 205.
Teoría de los agujeros negros, 188, 189, 190, 191.
Teoría corpuscular de la luz, 129.
Teoría del Éter, 138, 139.
Teoría especial de la relatividad, 143.
Teoría general de la relatividad, 167.
Teoría de la Matriz S, 115, 120, 121, 201, 244-249.
Teoría de la Medida, 94, 302.
Teoría ondulatoria de la luz, 75-81.
Teoría de las partículas elementales, 40, 41.
Teoría cuántica, 39, 196, 235, 254, 255, 256, 264, 274, 282.
Termal, energía, 34, 165.
Termodinámica, Segunda ley de la, 222.
Terrell, 150, 151, 152.
Tiempo absoluto, 156.
Tiempo, Espacio y, 156-166, 182, 274.
Tiempo, Irreversibilidad del, 222.
Tiempo propio, 147, 148, 149.
Tiempo relativo, 147, 148, 149.
Tiempo universal, 153.
Tierra, Movimiento de la, 43, 103, 132, 133, 135, 138.
Topología del quanto, 274, 310.

Transformación, Leyes de la, 134, 146, 147, 155.
Transición permitida, 267.
Transición prohibida, 267.
Transición, Tablas de, 267-270.
Triángulos, 159, 160, 161, 167, 168, 176, 177.
Trigonometría esférica, 183.
Tubos fotomultiplicadores, 286, 287, 288, 289.

U

Ultravioleta, Catástrofe, 65.
Uranio, 119, 164.

V

Vacío, diagramas de, 240.
Velocidad de la luz, 68-71, 131, 136, 137, 138, 141, 144, 146, 147, 152, 153-154, 155, 163.
Velocidad del sonido, 137, 155, 182.
Virtual, fotón, 223-230, 235, 236.
Virtual, pion, 231.
Virtuales, Teoría de las partículas, 223.
Vishnú, 218.
Volumen cero, 189.
Von Neumann, John, 94, 253, 255, 258, 267, 274, 302.

W

Walker, E. H., 78.
Watts, Alan, 28.
Weinberg-Salam, Teoría de, 234.
Weinzenbaum, Joseph, 45.
Wheeler, John, 48, 97, 98, 292.
Wu Li (definiciones), 27, 28.

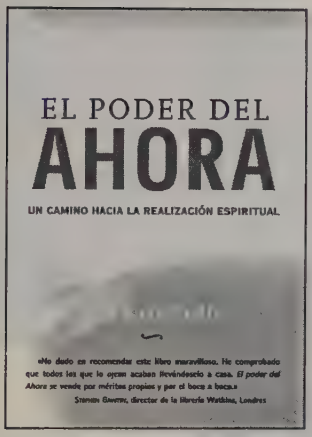
Y

«Ying y Yang», 58, 165.
Young, Experimento de la doble rendija de, 75, 76, 78, 107, 110.
Young, Teoría ondulatoria, 77.
Young, Thomas, 69, 75, 76, 80, 107, 110.
Yukawa, Hidecki, 227, 228, 231.

Z

Zen, 128, 206.
Zen, Budismo, 128, 206.
Zen, La mente de principiante del, 128.

En esta editorial



El poder del AHORA

Eckhart Tolle

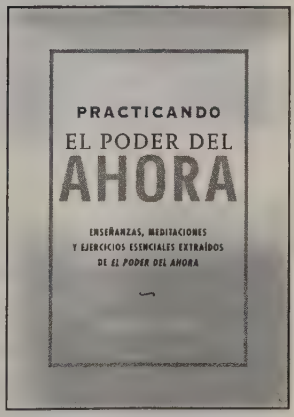
«*El Poder del Ahora* es una guía o curso completo de meditación y realización. Un libro para ser leído una y otra vez, porque en cada ocasión que vuelves a él encuentras más profundidad y significados. Con un creciente número de lectores, es ya considerado una obra maestra.»

(Del prólogo de Marc Allen)

Practicando El poder del AHORA

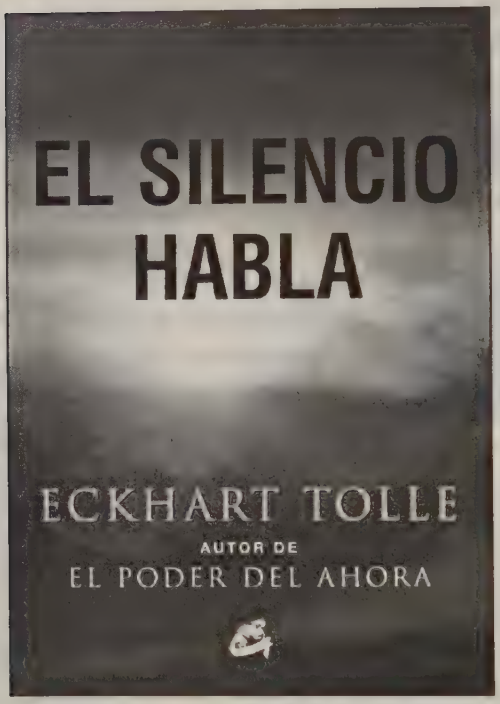
Eckhart Tolle

Enseñanzas, meditaciones y ejercicios esenciales extraídos de El poder del Ahora



Lo único que tienes que hacer es aceptar plenamente este momento. Entonces puedes estar cómodo en el aquí y el ahora, y sentirte a gusto contigo mismo.

En esta editorial



EL SILENCIO HABLA

Eckhart Tolle

«Este libro utiliza palabras que, al ser leídas, se convierten en pensamientos. Pero no en pensamientos repetitivos, ruidosos, complacientes, que demandan atención... Los pensamientos de este libro no dicen "mírame"; sino, "mira más allá de mí". Como los pensamientos han surgido de la quietud, tienen poder: el poder de llevarte a la misma quietud de la que surgieron. Esa quietud también es paz interior, y esa quietud y esa paz son la esencia de tu Ser. Es la quietud la que salvará y transformará el mundo.»

De la Introducción, por ECKHART TOLLE

En esta editorial

EL LIBRO DE LOS SECRETOS

Osho

Esta obra recoge las enseñanzas de Osho acerca de las 112 meditaciones del Vigyan Bhairav Tantra (literalmente, «técnicas para ir más allá de la consciencia»).

Aquí se encuentran las técnicas más antiguas conocidas, pero a la vez son lo último en meditación, porque ya no es posible añadir nada más. Incluyen todas las posibilidades de aclarar la mente y trascenderla.

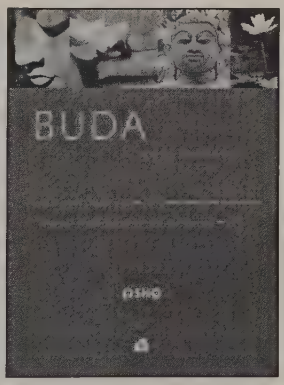
BUDA

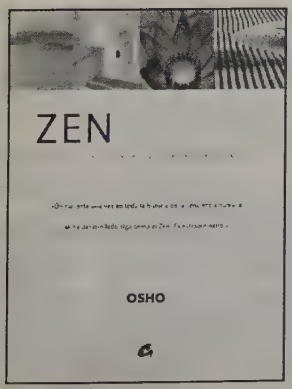
Su vida y enseñanzas

Osho

«Buda es un científico del mundo interno. Su contribución básica es la meditación: el giro que convierte la conciencia horizontal en conciencia vertical.»

OSHO





ZEN

Su historia y enseñanzas

Osho

«Únicamente una vez en toda la historia de la conciencia humana se ha desarrollado algo como el Zen. Es extraordinario.»

OSHO

En esta editorial

LA CONFERENCIA DE LOS PÁJAROS

Poemas selectos de Farid ud-Din Attar

Selección y versión
de Raficq Abdulla

Esta nueva y bella traducción permite al lector contemporáneo acceder a la sabiduría mística sufí de una de sus obras cumbres, que desde el siglo XII ha venido ejerciendo una inmensa influencia en el misticismo islámico.

LUZ DEL ALMA

Selección de poemas de Rumi

Versión y traducción de
Mahmud Piruz y José M.ª Bermejo

La presente obra es una exquisita selección de poemas de uno de los más grandes sufíes y poetas persas. La extremada sensibilidad del alma del poeta se expresa, con las imágenes más bellas, a través de una honda creatividad amorosa.

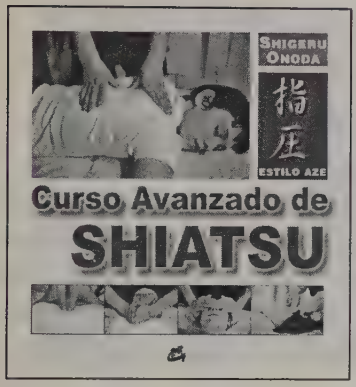
TAO TE CHING

Texto ilustrado

Lao Tzu. Versión de Stephen Mitchell

Una de las joyas de la humanidad y un tratado clásico sobre el arte de vivir. La presente edición está basada en la traducción inglesa de Stephen Mitchell, una de las más reputadas internacionalmente y de la cual se han vendido más de medio millón de ejemplares en todo el mundo. Ilustrado con pinturas de artistas taoístas.

En esta editorial



CURSO AVANZADO DE SHIATSU

Shigeru Onoda

Profusamente ilustrada y basada en el estilo AZE, esta obra nos presenta las prácticas, teorías y tratamientos de shiatsu para sanar las más variadas patologías a través del «macrotratamiento». Está especialmente dirigida a terapeutas o estudiantes de nivel medio o alto que deseen ampliar sus conocimientos.

CURSO BÁSICO DE SHIATSU

Shigeru Onoda

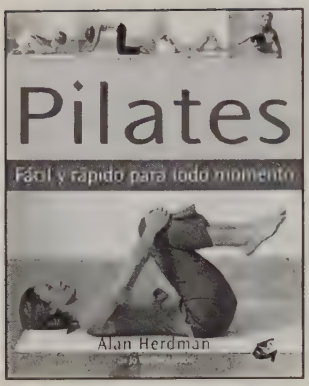
Acompañada de más de 340 ilustraciones, aprenderemos precisa y detenidamente la técnica básica de shiatsu. Una obra imprescindible para adentrarse en esta terapia japonesa.

TRATAMIENTO DE LA LUMBALGIA MEDIANTE SHIATSU

Shigeru Onoda

El shiatsu demuestra su eficacia en el tratamiento de la lumbalgia y otras dolencias de la espalda.

En esta editorial



PILATES

Fácil y rápido para todo momento

Alan Herdman

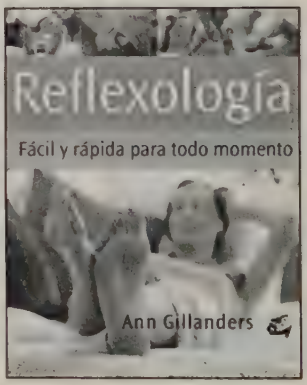
¿Alguna vez te has preguntado si existe algún sistema sencillo de ejercicios que te ayude a mejorar tu aspecto y reducir tus niveles de estrés? El método Pilates es la respuesta. En cualquier momento y en cualquier lugar, diseñado para que tu cuerpo y tu mente trabajen en armonía.

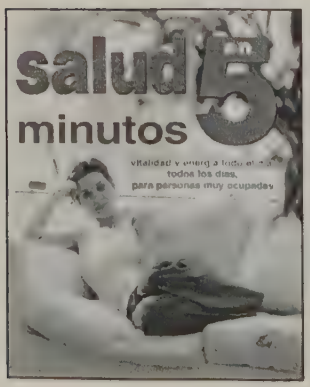
REFLEXOLOGÍA

Fácil y rápida para todo momento

Ann Gillanders

En la oficina, durante un largo viaje o en casa, la reflexología te ayudará a desterrar el estrés cotidiano. Esta práctica guía reune una gran variedad de ejercicios especialmente destinados a personas que llevan una vida muy estresante.





SALUD EN 5 MINUTOS

Vitalidad y energía todo el día, todos los días, para personas muy ocupadas

Jane Alexander

Las técnicas y terapias naturales que se proponen son simples y eficaces, mejorarán tu vitalidad y sanarán dolencias menores sin que tengas que modificar tu estilo de vida.

En esta editorial

LIBRO COMPLETO DE REIKI

Todos los niveles de Reiki (1.°, 2.°, 3. ° y maestría), complementados con ejercicios de recarga bioenergéticos, técnicas taoístas, meditaciones y oraciones

José María Jiménez Solana

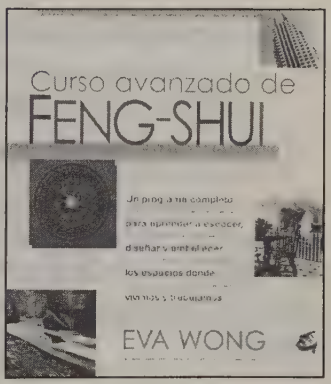
Una obra única para aprender todo cuanto se necesita saber acerca del uso de la energía vital y la práctica efectiva del Reiki.

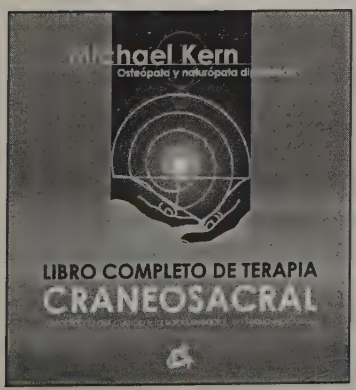
CURSO AVANZADO DE FENG-SHUI

Una guía avanzada para escoger, diseñar y embellecer los espacios donde vivimos

Eva Wong

Un curso profusamente ilustrado y detallado de feng shui para el diseño del hogar, del lugar de trabajo y modelar su entorno. Abarca tanto la historia del feng shui como su teoría y práctica.





LIBRO COMPLETO DE TERAPIA CRANEOSACRAL

La sabiduría del cuerpo y la salud esencial en teoría y práctica

Michael Kern

Una visión práctica y completa de la terapia craneosacral, uno de los métodos de sanación más seguros y eficaces, que orienta y estimula el cuerpo a reequilibrarse y curarse por sí mismo.

En esta editorial

CUENTOS PARA APRENDER A APRENDER

José María Doria

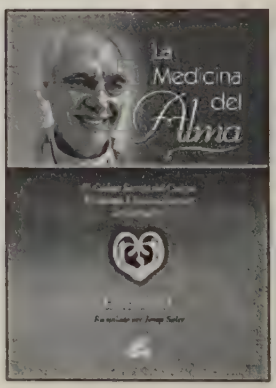
Los presentes relatos nos aportan un conjunto de principios que señalan las luces y sombras de la condición humana hacia la libertad. En sus páginas se conecta con toda una colección de grandezas y miserias humanas: el amor, la pasión, la dependencia, el miedo, el engaño, la avaricia, la incertidumbre y la búsqueda del sentido de la vida.

LA MEDICINA DEL ALMA

El código secreto del cuerpo,
el idioma creativo interior y la intuición

Eric Rolf (recopilado por Josep Soler)

¿Crees que las enfermedades ocurren porque sí, que son fruto de la casualidad y que somos víctimas del Universo? En *La Medicina del Alma* no existen las casualidades: la vida te habla a través del cuerpo.



LA TÉCNICA METAMÓRFICA

Principios y prácticas del masaje metamórfico

Gaston Saint-Pierre y Debbie Shapiro

Nos presenta una forma revolucionaria de ver la vida y un medio para cambiarla. Durante los nueve meses de gestación se establecen los potenciales de la vida humana, y se ha descubierto que, mediante el trabajo sobre los reflejos espinales de los pies, las manos y la cabeza, es posible volver a reactivar dicho período de formación.

Si deseas recibir información gratuita sobre nuestras novedades

- Llámanos

o

- Manda un fax

o

- Manda un e-mail

o

- Escribe

o

- Recorta y envía esta página a:

Gaia Ediciones

C/ Alquimia, 6
28933 Móstoles (Madrid)
Tel.: 91 614 53 46
Fax: 91 618 40 12
E-mail: contactos@alfaomega.es - www.alfaomega.es

Nombre: .....

Primer apellido: .....

Segundo apellido: .....

Domicilio: .....

Código Postal: .....

Población: .....

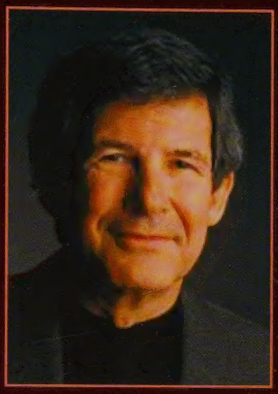
País: .....

Teléfono: .....

Fax: .....

E-mail: .....

La danza de los maestros de Wu Li



GARY ZUKAV

Nacido en Kansas, cursó estudios y se graduó en Harvard. Tras la publicación de *La Danza de los maestros de Wu Li*, un éxito de ventas que se ha consagrado como «la Biblia» de la Nueva Física, Zukav ha sido considerado uno de los exploradores intelectuales más importantes de nuestro tiempo.

Posteriormente ha publicado *El lugar del alma*, *The Heart of the Soul* y *The Mind of the Soul*. Su obra ha sido traducida a más de veinte idiomas y es cofundador, junto a su compañera espiritual, Linda Francis, de The Seat of the Soul Foundation, en donde imparte conferencias y organiza talleres.

La danza de los Maestros de Wu Li

Esta obra, galardonada con el National Book Award para libros científicos, es «la Biblia» para todos aquellos que carecen de formación científica pero que sienten curiosidad acerca de la filosofía, la sabiduría oriental y los fascinantes descubrimientos de la física más avanzada.

Al igual que un maestro de Wu Li, que primero nos enseñaría a asombrarnos de la caída de un pétalo antes de hablarnos de las leyes gravitatorias, Zukav nos enseña a asombrarnos con los hallazgos de la nueva física. Con un lenguaje ameno y sencillo, libre de tecnicismos y ecuaciones matemáticas, este libro permite que hasta el lector más lego comprenda las excitantes nuevas teorías físicas que se hallan cada vez más próximas a la visión de la sabiduría oriental..., desde la mecánica cuántica y la relatividad hasta el efecto Einstein-Podolsky-Rosen y el teorema de Bell.

«Desnuda de su lenguaje matemático, la física se convierte en un puro encantamiento... Por muy incapaz que seas en ciencias, terminarás este libro sintiéndote tú mismo un maestro de Wu Li.»

Christopher Lehman-Haupt, *The New York Times*

«Cuesta imaginar a alguien, por muy profano que sea, que no disfrute y aprenda con esta obra tan simpática y divulgativa.»

Martin Gardner, *Scientific American*

Divulgación científica
Filosofía de la ciencia
Nueva conciencia
Nueva era

Gaia Ediciones
www.alfaomega.es

ISBN 84-88242-87-5

COLECCIÓN: CONCIENCIA GLOBAL